

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos

Área de Ingeniería Térmica



PROYECTO FINAL DE CARRERA

**SILLA DE RUEDAS DE BAJO
PRESUPUESTO CAPACITADA PARA
SUBIR TRAMOS ESCALONADOS**

Autor: JACOBO MOSQUERA DÍAZ DE AGUILAR

Director: ULPIANO RUIZ-RIVAS HERNANDO

Ingeniería Técnica Industrial Mecánica

Diciembre 2012

Agradecimientos:

Gracias Ulpiano por interesarte al instante en este proyecto sin tomarme por loco.

Gracias Iván, Dominique, Fernando, Isidro y tantos otros por darme piezas de segunda mano y ofrecerme ayuda y consejos una y otra vez.

Gracias familia por vuestro apoyo y por aguantarme un año invadiendo el garaje con trastos.

Gracias Álvaro por tus consejos y por sacarme de todo tipo de apuros.

Gracias compañeros de universidad, por dejarme miles de apuntes año tras año, por vuestras lecciones magistrales el día antes de los exámenes, por salvarme en tantas prácticas en las que estaba perdido, y sobre todo, gracias Isa y Manu por vuestra amistad y compañía durante tantas horas de prácticas, y clases... Sin todos vosotros nunca habría llegado hasta el proyecto.

Índice

1	Introducción.....	- 7 -
2	Estudio de las necesidades	- 8 -
2.1	Estudio de cifras demográficas.	- 8 -
2.2	Estudio sobre obstáculos e impedimentos comunes	- 13 -
3	Estudio de las soluciones.....	- 17 -
3.1	Soluciones ajenas a las sillas de ruedas modificadas	- 17 -
3.2	Sillas de ruedas modificadas	- 23 -
3.3	Dispositivos presentes en las sillas seleccionadas.	- 34 -
3.4	Características deseables de las sillas de ruedas modificadas.....	- 35 -
3.5	Análisis de cualidades de las sillas de ruedas.	- 38 -
3.6	Compendio de opciones después del análisis.....	- 39 -
4	Decisiones del diseño	- 41 -
4.1	Sobre el mecanismo para trasladarse	- 41 -
4.2	Sobre el mecanismo para cambiar el apoyo de la silla.....	- 41 -
4.3	Sobre el mecanismo de tracción y el mecanismo para acceder y salir de los tramos escalonados.....	- 42 -
5	Fase de diseño	- 43 -
5.1	Definición del prototipo.....	- 43 -
5.2	Relación de piezas del diseño:	- 54 -
5.3	Análisis geométrico del primer diseño:	- 57 -
6	Construcción de un prototipo	- 66 -
6.1	Primera construcción	- 67 -
6.2	Modificaciones al diseño	- 73 -
6.3	Segunda construcción	- 77 -
6.4	Estudio de cargas	- 85 -
6.5	Presupuesto fabricación	- 106 -
7	Conclusiones del proyecto.....	- 108 -
8	Referencias	- 109 -

1 Introducción

Este proyecto busca una solución innovadora para una silla de ruedas que sea capaz de subir tramos escalonados, de uso autónomo y que tenga el menor coste posible, para ser accesible al mayor número de personas posible.

La demanda de una silla de ruedas capaz de subir escalones existe desde el mismo momento en que se inventaron las sillas de ruedas. La primera silla de ruedas creada para una persona con discapacidad de la que se tiene constancia fue creada para Felipe II de España en 1595. El diseño de silla de ruedas que todos conocemos hoy por hoy fue creado por el ingeniero Harry Jennings en 1932[1]. Se estima que aproximadamente un 1% de la población mundial requiere una silla de ruedas y que actualmente existen en el mundo más de 1900 millones de personas que viven por debajo del umbral de la pobreza [2], teniendo en cuenta estos datos resulta evidente el interés que tiene el objetivo de este proyecto, sin pretender ser ambiciosos.

Este proyecto abarca principalmente tres etapas, un estudio de la técnica sobre materia de sillas de ruedas y obstáculos, una fase de diseño de nuestra solución y una fase de fabricación de un prototipo. Guía para entender el alcance del proyecto:

- Estudio de necesidades: En este apartado se da una idea de la posible demanda existente de sillas de ruedas capacitadas para subir tramos escalonados y del tipo de obstáculos con el que se encuentran las sillas de ruedas en el día a día.
- Estudio de soluciones: Compendio de todas las soluciones tomadas hasta la fecha para solucionar el problema de subir escalones en silla de ruedas.
- Decisiones del diseño: Ideas y soluciones que se han extraído del estudio de la técnica realizado previamente.
- Fase de diseño: Realización del diseño en base a las decisiones anteriores y explicación de su funcionamiento.
- Construcción del prototipo: Construcción de un modelo simplificado del diseño con los recursos mínimos posibles.
- Conclusión: Aspectos aprendidos durante la realización del proyecto y resultados obtenidos.

2 Estudio de las necesidades

2.1 Estudio de cifras demográficas.

Para tener una idea aproximada de la posible demanda existente de una silla de ruedas capaz de subir escalones se recopilaban datos del número de usuarios de sillas de ruedas en España y del número de sillas de ruedas demandadas mundialmente.

2.1.1 Datos estadísticos sobre España:

Como primer paso se buscaron datos sobre el entorno más directo, es decir, los usuarios de sillas de ruedas en España. A continuación se muestra una tabla sobre el número usuarios de sillas de ruedas en España según edad. Datos extraídos del Instituto Nacional de Estadística (INE):

Intervalo de edad	Nº individuos	% sobre la población	% sobre discapacitados
Menores de 6 años	11.644	0.03	0.33
De 6 a 64 años	414.649	1.06	11.75
Mayores de 64 años	809.383	2.06	22.94
Total	1.235.676	3.15	35.02

Tabla 1 Usuarios de sillas de ruedas [3]

De esta tabla se extrae que la posible demanda de sillas de ruedas capacitadas para subir tramos escalonados, tan sólo en España, en el caso de que sólo tuviera una buena aceptación para su uso autónomo, podría ascender a los 414.649 usuarios, lo que significaría que más del 1% de la población española demandaría una de estas sillas y más del 10% de las personas discapacitadas. Para elegir estos valores se ha considerado que como norma general, los usuarios mayores de 64 años no se encontrarían en las condiciones físicas idóneas para subir los tramos escalonados de forma autónoma, uno de los objetivos de este proyecto.

2.1.2 Datos mundiales:

Para la obtención de datos, tablas y gráficos sobre el uso y demanda de sillas de ruedas a nivel mundial se acudió *al Estudio Mundial sobre la Discapacidad* realizado por la Organización Mundial de la Salud en 2011 [2].

- **Demanda de sillas de ruedas**

A pesar de la *Convención de los Derechos de las Personas con Discapacidad de las Naciones Unidas* que defiende el derecho a todos los medios necesarios para la accesibilidad de las personas con discapacidad [4], los estudios de la OMS arrojan los siguientes datos:

- Aproximadamente el 1% de la población mundial necesita una silla de ruedas, lo que significa un 10% de la población con algún tipo de discapacidad.
- Los estudios nacionales en algunos países de África como Malawi, Mozambique, Zambia y Zimbabwe arrojan datos como que tan sólo entre el 17 y el 37% de las personas que necesitan dispositivos para su movilidad tienen acceso a ellos y además existen desigualdades sobre la disponibilidad de éstos entre hombres y mujeres. En Malawi disponían de ellos un 25,3 % de los hombres discapacitados y tan sólo un 14,1 % de las mujeres. Del mismo modo ocurría en Zambia, disponiendo de los dispositivos un 15,7% de los hombres y un 11,9% de las mujeres.

- **Crecimiento de la demanda de sillas de ruedas**

La Organización Mundial de la Salud predice que la demanda de sillas de ruedas aumentará debido a varias causas, entre las que se encuentran:

- El envejecimiento de la población
- El aumento de las enfermedades crónicas, como son:
 - El incremento de casos de diabetes
 - La frecuencia de accidentes cardiovasculares
 - El aumento de casos de cáncer

- El crecimiento del número de vehículos de automoción y el consiguiente aumento de accidentes de tráfico

- **Distribución de discapacidades**

El estudio más general que se puede hacer es aquel que muestre el porcentaje de población con discapacidad según región, sexo y edad. Hay que entender que el nivel de ingresos de la población está íntimamente ligado a la región que se esté estudiando.

Todos estos datos se pueden extraer de la siguiente tabla.

Estimated prevalence of moderate and severe disability, by region, sex, and age, Global Burden of Disease estimates for 2004								
Sex/age group	Percent							
	World	High-income countries	Low-income and middle-income countries, WHO region					
			African	Americas	South-East Asia	European	Eastern Mediterranean	Western Pacific
Severe disability								
Males								
0–14 years	0.7	0.4	1.2	0.7	0.7	0.9	0.9	0.5
15–59 years	2.6	2.2	3.3	2.6	2.7	2.8	2.9	2.4
≥ 60 years	9.8	7.9	15.7	9.2	11.9	7.3	11.8	9.8
Females								
0–14 years	0.7	0.4	1.2	0.6	0.7	0.8	0.8	0.5
15–59 years	2.8	2.5	3.3	2.6	3.1	2.7	3.0	2.4
≥ 60 years	10.5	9.0	17.9	9.2	13.2	7.2	13.0	10.3
All people								
0–14 years	0.7	0.4	1.2	0.6	0.7	0.8	0.9	0.5
15–59 years	2.7	2.3	3.3	2.6	2.9	2.7	3.0	2.4
≥ 60 years	10.2	8.5	16.9	9.2	12.6	7.2	12.4	10.0
≥ 15 years	3.8	3.8	4.5	3.4	4.0	3.6	3.9	3.4
All ages	2.9	3.2	3.1	2.6	2.9	3.0	2.8	2.7
Moderate and severe disability								
Males								
0–14 years	5.2	2.9	6.4	4.6	5.3	4.4	5.3	5.4
15–59 years	14.2	12.3	16.4	14.3	14.8	14.9	13.7	14.0
≥ 60 years	45.9	36.1	52.1	45.1	57.5	41.9	53.1	46.4
Females								
0–14 years	5.0	2.8	6.5	4.3	5.2	4.0	5.2	5.2
15–59 years	15.7	12.6	21.6	14.9	18.0	13.7	17.3	13.3
≥ 60 years	46.3	37.4	54.3	43.6	60.1	41.1	54.4	47.0
All people								
0–14 years	5.1	2.8	6.4	4.5	5.2	4.2	5.2	5.3
15–59 years	14.9	12.4	19.1	14.6	16.3	14.3	15.5	13.7
≥ 60 years	46.1	36.8	53.3	44.3	58.8	41.4	53.7	46.7
≥ 15 years	19.4	18.3	22.0	18.3	21.1	19.5	19.1	18.1
All ages	15.3	15.4	15.3	14.1	16.0	16.4	14.0	15.0

Tabla 2 Discapacidades según regiones, obtenido de [2], se pide disculpas por encontrarse el rótulo en inglés.

De la anterior tabla podemos extraer algunas informaciones. Los porcentajes más altos de personas con discapacidad severa los encontramos siempre en el continente africano, independientemente de la edad. En contraste con el continente africano, el cual posee muchos países en vías de desarrollo, podemos encontrar que los porcentajes más pequeños de discapacidad se encuentran en los países con mayor renta per cápita. Esta diferencia se debe principalmente al desarrollo y accesibilidad a los sistemas de sanidad de cada país, y por consiguiente a los medios de prevención de enfermedades. Enfermedades como la polio, totalmente erradicadas en los países más desarrollados económicamente, dejan miles de personas discapacitadas cada año en países en los que la mayoría de la población no tienen acceso a la sanidad o a los medicamentos. Lo más grave que se extrae de esta comparación es que las mayores diferencias entre el porcentaje de discapacitados en los países con mayores ingresos y los países más pobres se dan entre niños y adolescentes, llegando a triplicar el porcentaje de niños discapacitados en África (1,2 %) el porcentaje de niños discapacitados en los países más ricos (0,4%).

De igual forma los países más pobres del sudeste asiático y este del mediterráneo presentan unos porcentajes de discapacidad muy altos, aproximándose mucho más a los valores africanos si se incluyen las discapacidades moderadas.

- **Población mundial con discapacidad.**

La capacidad para moverse se puede dividir en varios niveles. En la siguiente tabla, la OMS diferencia entre la capacidad para moverse normalmente y la capacidad para una actividad intensa, como puede ser la práctica de deporte. En este estudio la OMS distribuye los porcentajes de población entre cinco diferentes niveles de gravedad.

Proportion of respondents reporting different levels of difficulty on 16 World Health Survey domains of functioning					
	None	Mild	Moderate	Severe	Extreme
Mobility					
Moving around	64.8	16.5	11.4	5.9	1.3
Vigorous activity	50.7	16.0	13.3	10.3	9.7

Tabla 3 Afectaciones según tipo y gravedad, obtenido de [2]

Como vimos que ocurría con la población española, la población que tiene graves dificultades para moverse y que por lo tanto requiere de una silla de ruedas está ligeramente por encima del 1% de la población total. Otro dato que resulta de interés en esta tabla es que tan sólo el 50 % de la población puede realizar actividad física intensa sin ninguna dificultad específica.

- **Población con discapacidad según nivel económico del país y sexo.**

En el estudio de la OMS también se quiso poner en evidencia la diferencia entre el número de discapacitados en los países pobres, como ya hemos analizado anteriormente, y el número de discapacitados entre mujeres y hombres.

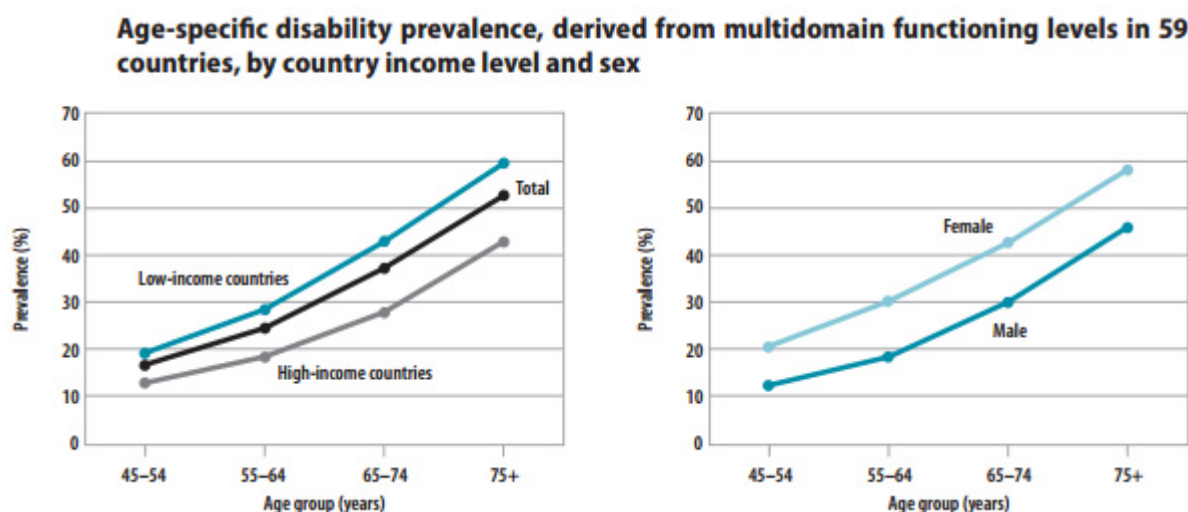


Ilustración 1 Gráficas comparativas, obtenido de [2]

En la gráfica que diferencia entre países con altos ingresos y países con bajos ingresos vemos que la mayor diferencia porcentual se da en el rango de 75 años de edad en adelante. Sin embargo, lo cierto es que la diferencia resulta mucho más acusada en el intervalo de 45 a 54 años, ya que el número de discapacitados totales es mucho menor. En este rango el número de discapacitados en los países con menor nivel económico prácticamente dobla el número de discapacitados en los países con mayores ingresos, dato muy significativo. Como ya hicimos en el análisis de tablas anteriores, podemos afirmar que el número de discapacitados está estrechamente unido al nivel de recursos del país en cuestión.

En la segunda gráfica vemos que el porcentaje de mujeres discapacitadas es sensiblemente mayor que el número de hombres discapacitados. Al igual que ocurría en la anterior gráfica, esta diferencia es más acusada en el intervalo de edad entre los 45 y los 54 años, ya que el porcentaje de mujeres discapacitadas casi dobla al de hombres discapacitados.

- **Conclusiones del estudio de cifras demográficas**

- El porcentaje de población que demanda una silla de ruedas a nivel mundial es muy alto, mayor del 1%.
- El porcentaje de población que requiere de una silla de ruedas es mayor en los países del tercer mundo.
- La demanda de silla de ruedas no se ha satisfecho en la mayoría de los países del tercer mundo, y la demanda de sillas de ruedas capaces de superar escalones no se ha satisfecho aún en ningún lugar del mundo.
- De las personas usuarias de sillas de ruedas existe un porcentaje importante de personas con alta capacidad física, que podrían hacer uso de una silla de ruedas de tracción manual.

2.2 Estudio sobre obstáculos e impedimentos comunes

En este apartado se da una idea general del tipo de obstáculos que se espera poder superar con la silla de ruedas a diseñar. El diseño que se busca está destinado a ser usado en zonas pobladas, y para superar obstáculos creados por el hombre. No se busca un diseño todoterreno capaz de circular por la montaña.

- **Escalones sueltos**

A pesar de parecer los obstáculos más insignificantes y menos problemáticos lo cierto es que es un obstáculo infravalorado. Un solo escalón es suficiente para impedir el paso a una persona que circule en silla de ruedas y los escalones sueltos se encuentran por todos lados, así en grandes ciudades como en pequeños pueblos del tercer mundo. Los escalones sueltos pueden ser superados con la ayuda de una segunda persona que tire de la silla marcha atrás en subida y que la estabilice marcha adelante en bajada.

Algunos ejemplos de escalones a pie de calle:



Ilustración 2 Escalones a pie de calle

Si bien es cierto que los escalones a pie de calle los encontramos tanto en países del tercer mundo como en países del primer mundo, las ciudades de estos últimos están mucho mejor habilitadas y muchos de los accesos para peatones están provistos de rampas.

- **Conjuntos de pocos escalones**

Estos obstáculos se pueden encontrar tanto a nivel de calle, para salvar desniveles del terreno, como en el acceso o interior de edificaciones. A diferencia de las grandes ciudades del primer mundo, en muchas ciudades superpobladas del tercer mundo las edificaciones apenas van más allá de la planta baja. De este modo, encontrar una silla que pueda superar algunos escalones sueltos podría ser una solución suficiente para las poblaciones más pobres.

Un ejemplo de un barrio pobre de Guatemala y un ejemplo de un conjunto de pocos escalones en un pueblo:



Ilustración 3 Barrio pobre y conjunto de escalones

- **Escaleras de edificios**

Como hemos indicado en el apartado anterior, en los países menos desarrollados los edificios de varios pisos tienen una presencia menor, sin embargo existen también muchas ciudades con grandes edificaciones en la que el nivel de renta de los habitantes es muy bajo o bajo.

Ejemplo de escalera y edificios en la ciudad vietnamita Hồ Chí Minh:



Ilustración 4 Escaleras y ciudad de Ho Chi Minh

Como se verá más adelante, nuestro diseño será de tracción manual, por lo que la capacidad para superar grandes desniveles de forma autónoma vendrá definida por la forma física del usuario.

- **Especificaciones de los escalones**

Como referencia para la realización del proyecto se tomaron las especificaciones sobre escalones que se recogen en la legislación española.

- **Documento Básico de Seguridad de Utilización (DB-SU) [5]**

Éste código establece que la huella **H** y la contrahuella **C** cumplirán a lo largo de una misma escalera la siguiente relación:

$$54 \text{ cm} \leq 2C + H \leq 70 \text{ cm}$$

Siendo la huella la longitud del tramo horizontal del escalón y la contrahuella el tramo vertical entre escalón y escalón.

- **Normativa DB-SU del CTE [6]**

Los peldaños en los espacios públicos tendrán en los tramos rectos una huella mínima de **28 cm**, y en tramos rectos o curvos la contrahuella medirá **13 cm** como mínimo y **18,5 cm** como máximo.

3 Estudio de las soluciones

3.1 Soluciones ajenas a las sillas de ruedas modificadas

3.1.1 Rampas

Las rampas de acceso se pueden clasificar en dos tipos:

3.1.1.1 Rampas de obra.

Son la solución más común para el acceso a edificios públicos, es decir, escalones exteriores, así como para obstáculos a pie de calle, como los bordillos de la acera.

- Coste:

Su coste es muy variable debido a la infinidad de formas, tamaños y materiales posibles. Como ejemplo, en España sustituir 5 escalones por una pequeña rampa de hormigón con barandilla puede oscilar entre los 1500 y 4000 euros.

- Ventajas:

- No necesitan mantenimiento.
- Pueden ser utilizadas por todos los usuarios que necesiten acceder al edificio.

- Inconvenientes:

- Evidentemente son una solución estática, habría que realizar reformas en todas las edificaciones existentes.
- No siempre es viable. En obstáculos con mucha pendiente, estrechos o con curvatura puede resultar imposible construir una rampa o resultar ésta inaccesible.

Algunos ejemplos:



Ilustración 5 Rampas de obra

3.1.1.2 Rampas portátiles.

Son la solución más utilizada en medios de transporte. También es utilizada en viviendas particulares.

- Coste:

Al igual que con las rampas de obra su coste puede ser muy variado, sin embargo es también mucho menor. En España se pueden encontrar rampas para el acceso a vehículos desde 200 euros.

- Ventajas:

Son relativamente versátiles, si bien no pueden acompañar siempre al usuario sí que se pueden cambiar de posición dentro de una edificación o transportar con el vehículo en el que se use.

- Inconvenientes:

Han de ser instaladas y desinstaladas constantemente, el usuario no las puede transportar en su silla de ruedas.

Algunos ejemplos:



Ilustración 6 Rampas portátiles

3.1.2 Soluciones mecánicas de obra (instaladas en el obstáculo)

3.1.2.1 Sillas salva escaleras

Solución de uso más extendido en los países de occidente de avanzado desarrollo industrial. Aunque también se instalan en edificios públicos su uso más común es en las viviendas particulares con tramos escalonados o de varios pisos.

- Coste:

En Europa los modelos más básicos pueden obtenerse a partir de 4000 euros.

- Ventajas:

La principal ventaja de estos mecanismos es que pueden superar grandes diferencias de altura y que además pueden instalarse en escaleras estrechas y con formas complicadas.

- Inconvenientes:

Sólo sirven para superar el obstáculo en el que están instaladas. Para personas que son capaces de andar pequeñas distancias, como las personas ancianas, resultan una solución adecuada, pero las personas con inmovilidad en las piernas necesitan poseer una silla de ruedas en el piso superior y otra en el piso inferior.

Tienen un coste relativamente alto para la población de los países más industrializados, y totalmente inalcanzable para la mayoría de la población de los países con menos ingresos. Además, en los países menos industrializados no se comercializan y son de difícil acceso.

Un ejemplo:



Ilustración 7 Silla salva-escaleras

3.1.2.2 Plataformas elevadoras

Existen de dos tipos, de elevación vertical, para superar pequeños desniveles, y salva escaleras. Las plataformas salva escaleras tienen más presencia en el ámbito público que las sillas salva escaleras, ya que cualquier persona puede hacer uso de ellas sin necesidad de abandonar su propia silla de ruedas.

- Coste:

Tienen un coste similar al de las sillas salva escaleras (4000 euros).

- Ventajas:

La principal ventaja es que cualquier persona puede hacer uso de ellas con su propia silla de ruedas ya que las plataformas están hechas para acceder a ellas con la silla.

- Inconvenientes:

Al igual que las sillas salva escaleras tienen un precio elevado. Sólo se pueden usar allá donde se instalen. Son menos flexibles que las sillas salva-escaleras para usarse en escaleras estrechas y con recorridos complicados.

Algunos ejemplos:



Ilustración 8 Plataforma elevación vertical y plataforma salva-escaleras

3.1.3 Mecanismos para asistir a las sillas de ruedas

3.1.3.1 Sillas de estrella de ruedas

Son sillas que incorporan en la parte trasera una estrella de tres puntas con una pequeña rueda en cada extremo. Estas ruedas se van alternando como apoyo de la silla según la estrella va rotando en el progreso por los escalones.

- Coste:

Son la solución más económica existente. Se pueden encontrar por 100-200 euros.

- Ventajas:

Bajo coste. Se puede transportar fácilmente.

- Inconvenientes:

El usuario se ha de desplazar desde su silla de ruedas a esta silla auxiliar. Necesita de un tercero que además, debe realizar el todo el esfuerzo de desplazar al usuario. Su movimiento puede resultar poco fluido y violento para el usuario.

Un ejemplo:



Ilustración 9 Silla de estrella de ruedas

3.1.3.2 Orugas acoplables a las sillas de ruedas

Dentro de los mecanismos externos son la solución más utilizada. Consisten en pequeñas orugas, generalmente de dos correas, que se acoplan debajo la silla de ruedas estándar y son maniobradas por una tercera persona desde atrás durante los descensos/ascensos de tramos escalonados. Suelen ir propulsadas por motores eléctricos. Esta solución nunca ha llegado a tener una gran aceptación real. Su uso es muy reducido.

- Coste:

En Europa estas orugas portátiles pueden encontrarse a partir de 5000 euros.

- Ventajas:

La oruga portátil puede transportarse para utilizarse en diferentes tramos escalonados. No necesita obra.

- Inconvenientes:

Nuevamente se trata de una solución económicamente inalcanzable para la mayoría de la población mundial. Necesita de una tercera persona para su uso. Ha de acoplarse y desacoplarse cada vez que se quiera superar tramos escalonados.

Un ejemplo:



Ilustración 10 Oruga acoplable

3.2 Sillas de ruedas modificadas

3.2.1 Introducción

Al igual que los mecanismos externos acoplables a las sillas de ruedas su presencia real es mínima, en proporción al número de sillas de ruedas existentes en el mundo, y han tenido muy poca aceptación por los usuarios a pesar de la infinidad de modelos. Podemos encontrar todo tipo de sillas con mecanismos electrónicos, mecánicos, hidráulicos, ruedas especiales, orugas integradas, sillas con patas, etc. Muchas de las soluciones diseñadas no han llegado a fabricarse en serie.

Las soluciones que más se han desarrollado y más presencia tienen son las relacionadas con orugas. Existen infinidad de diseños diferentes que incorporan pequeñas orugas en la silla.

Los precios de estas sillas son similares a los de las orugas acoplables, rondando los 5000 euros.

Algunos ejemplos:



Ilustración 11 Ejemplos sillas modificadas

3.2.2 Estudio de la técnica sobre sillas de ruedas modificadas

Para este estudio y clasificación se ha seleccionado una muestra de 18 patentes de las 298 existentes en el ámbito de sillas de ruedas capaces de superar escalones. En esta muestra hay patentes representantes de todas las posibles soluciones diseñadas hasta el momento, de todo tipo de nacionalidades y abarcando un abanico de fechas importante.

3.2.2.1 Dispositivos de oruga

Se trata del dispositivo principal y más extendido en materia de superación de obstáculos, tanto en sillas de ruedas como vehículos militares o vehículos lunares por ejemplo. El mecanismo se basa en una cinta dentada, cuyo recorrido es cerrado formando un lazo que se desliza sobre una superficie propulsada por rodillos dentados o adherentes. Generalmente los rodillos o ruedas motores son los situados en los extremos de la cinta, teniendo generalmente otros rodillos intermedios que sirven de apoyo del vehículo y dan consistencia a la cinta para poder mantenerse recta y no deformarse en exceso en el paso de obstáculos.

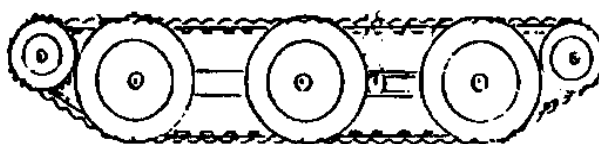


Ilustración 12 Ejemplo de oruga; patente CN2461518Y, obtenido de [7]

3.2.2.2 Transmisiones de tracción manual por manivela

Si bien estamos acostumbrados a ver la silla de ruedas estándar de tracción manual mediante impulso manual directamente sobre las ruedas, la realidad es que la mayoría de las sillas de ruedas diseñadas para la superación de obstáculos son de tracción motorizada. Esto es un gran impedimento ya que aunque abre su uso a las personas mayores o más discapacitadas, limita su uso a las personas con recursos del primer mundo. Esto se debe a los elevados precios que tienen estos sistemas complejos y automatizados. El problema es aún mayor cuando consideramos el gran mantenimiento que requieren estos sistemas. Sin embargo, sí que existen algunas patentes que incorporan sistemas de tracción manual similares al de una bicicleta, con un piñón en el sistema de oruga o sistema pertinente, y otro en un sistema de manivela manual, que se correspondería con los pedales de una bicicleta.

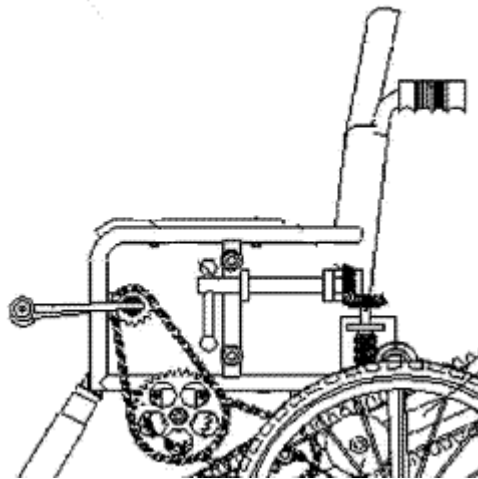


Ilustración 13 Ejemplo de tracción manual desde manivela; patente CN102204858A, obtenido de [8]

3.2.2.3 Transmisiones de tracción manual desde las ruedas

De manera similar al caso anterior pero esta vez la transmisión por cadena va desde el eje mismo de las ruedas a la oruga o mecanismo correspondiente que impulse la misma.

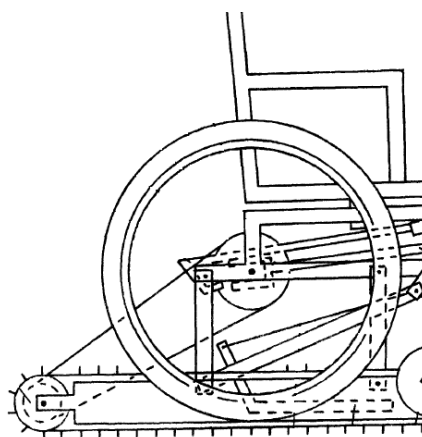


Ilustración 14 Ejemplo de tracción manual desde eje rueda; patente CN2139437Y, obtenido de [9]

3.2.2.4 Sistemas para cambiar el apoyo de la silla de ruedas.

En todas aquellas sillas que lleven un sistema auxiliar para circular por escaleras es condición necesaria un mecanismo que les permita cambiar el apoyo de las ruedas con las que circulan normalmente al sistema auxiliar. Las sillas diseñadas con ruedas especiales para circular por escaleras o bien sillas pensadas para moverse siempre sobre una oruga no necesitarán de este mecanismo.

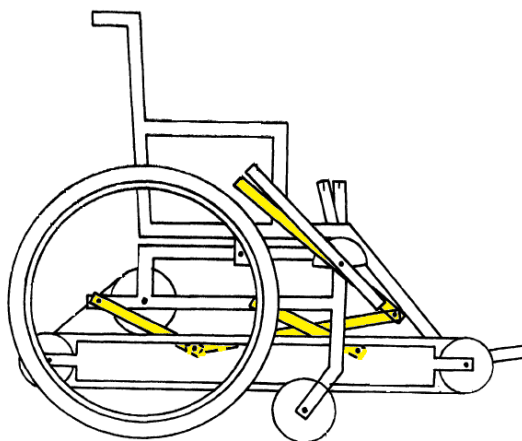


Ilustración 15 Ejemplo de mecanismo para cambiar el apoyo de ruedas a oruga; patente CN2139437Y, obtenido de [9]

3.2.2.5 Ruedas especiales para circular sobre escalones

Una de las alternativas elegidas en el diseño de ruedas capaces de superar escalones es la de la creación de ruedas especiales para poder circular directamente sobre los escalones.

Estrellas de ruedas:

Es el diseño de ruedas especiales más extendido, es decir, un conjunto de patas situadas radialmente (usualmente 3) en cuyos extremos se monta una rueda de pequeño tamaño. Estas patas van girando en torno a su centro de manera que las ruedas de los extremos se van desplazando y encajando entre escalones.

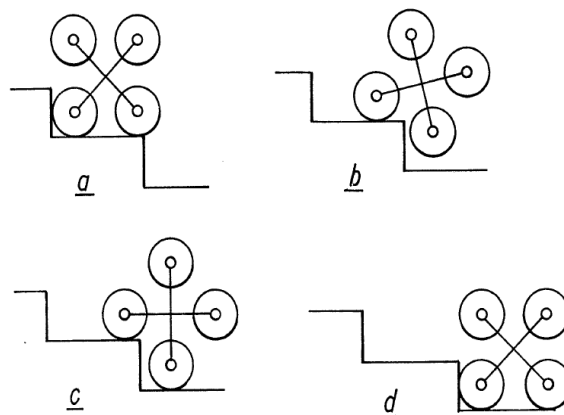


Ilustración 16 Ejemplo de funcionamiento de las estrellas de ruedas; patente GB2112330A, obtenido de [10]

Ruedas dentadas:

Existen también diferentes diseños, que funcionarían de manera similar a las orugas dentadas. Las ruedas sin embargo tendrían el inconveniente de realizar un recorrido abrupto e incómodo para el ocupante. Podemos ver el diseño del ejemplo presenta la peculiaridad de estar pensado para avanzar marcha adelante en lugar de marcha atrás como en la mayoría de diseños, para ello el sistema que monta para nivelación de la silla funciona en sentido inverso al de la mayoría.

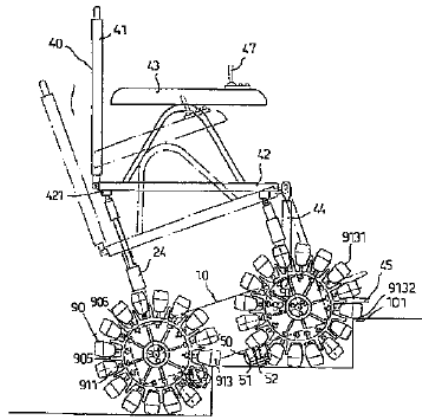


Ilustración 17 Ejemplo de ruedas dentadas; patente JP2001017480A. obtenido de [11]

Ruedas con flecos:

Un caso diferente al de la mayoría de soluciones. Estos flecos trabajarían principalmente en el ascenso al facilitar el acceso y agarre al siguiente escalón, entorpeciendo a la vez la marcha atrás.

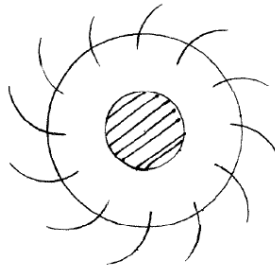


Ilustración 18 Ejemplo de rueda con flecos; patente CN101003290A, obtenido de [12]

Ruedas deformables

Caso especialmente particular que podría ser de gran interés si no fuera por su gran complejidad y evidente falta de eficiencia energética. Problema importante en nuestro caso al buscar una silla de ruedas de tracción humana.

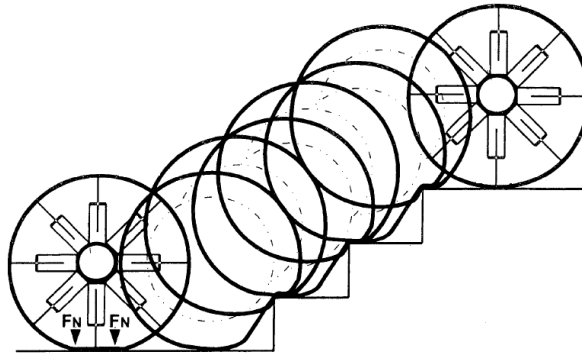


Ilustración 19 Ejemplo ruedas deformables; patente DE102009052253A1, obtenido de [13]

3.2.2.6 Mecanismo tractor de tornillo sin fin

Existe una variante de diseño en el que se monta una estructura en forma de espira o muelle de manera longitudinal bajo la silla. Las espiras encajan con los escalones y al girar esta sobre su eje se desplaza arriba o abajo impulsándose contra estos. Sistema muy poco eficiente energéticamente.

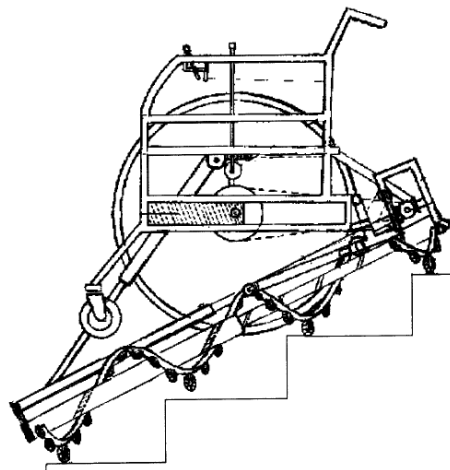


Ilustración 20 Ejemplo de mecanismo de tornillo sin fin; patente CN201005886Y, obtenido de [14]

3.2.2.7 Sistema de tracción directa mano-escalón

De estas características existe exclusivamente una patente, de bastante sencillez. Aunque en un primer momento pareció no ser relevante, en seguida fue tomada en cuenta ya que traccionar la silla directamente empujándose el usuario con sus manos sobre los escalones simplifica la silla y abarata los costes enormemente, lo que la hace infinitamente más asequible. Uno de los objetivos clave de este proyecto.

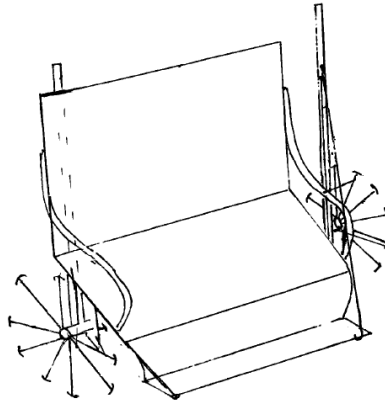


Ilustración 21 Ejemplo de tracción mano/escalón; patente CN201135560Y, *obtenido de [15]*

3.2.2.8 Sistemas para entrar y salir de tramos de escalones

Las sillas dotadas con sistema de oruga necesitan de algún mecanismo para pasar del plano horizontal al plano de los escalones y poder acceder al primero, así como una manera de volver a apoyarse en el suelo al terminar el tramo de escalones. Actualmente existen dos métodos.

Pata articulada

Colocación de una pata trasera con una zona dentada que se apoya en el primer escalón cuando se va a iniciar la subida de los escalones y al girar empuja la silla montándola sobre los escalones apoyada en la oruga.

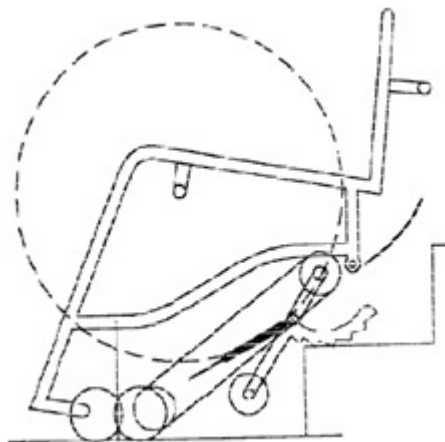


Ilustración 22 Ejemplo de pata para abordar escaleras; patente DE102006049711A1, *obtenido de [16]*

Oruga articulada

Articulación de los extremos delantero y trasero de la oruga para que se puedan ajustar a la inclinación de las escaleras tanto al iniciar el ascenso como el descenso. De esta manera la silla cambia de ángulo ajustándose a las escaleras.

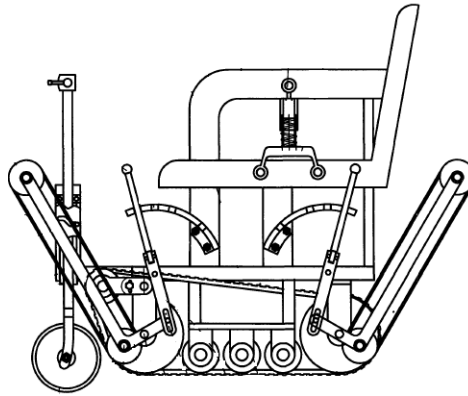


Ilustración 23 Ejemplo de extremos de oruga abatibles; patente CN201492595U, obtenido de [17]

3.2.2.9 Alineación de ruedas dentadas similar al sistema de oruga

Una placa rígida y recta sujeta una alineación de pequeñas ruedas dentadas que desplazan la silla sobre las aristas de los escalones.

De este método sólo se encontró una patente, aunque parece un sistema eficiente es demasiado complejo, ya que busca que cada una de las ruedas sea motora independientemente.

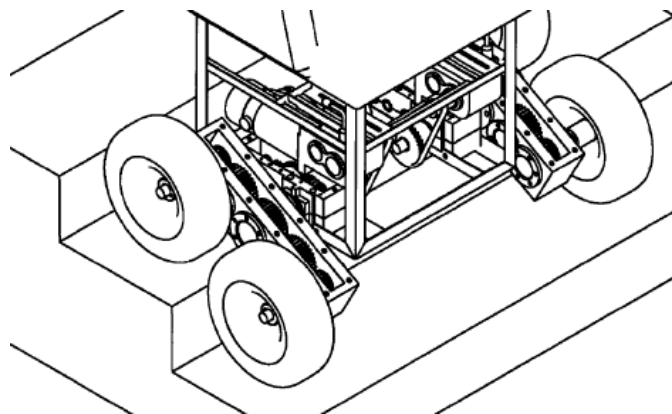


Ilustración 24 Ejemplo de hilera de ruedas dentadas; patente CN201642630U, obtenido de [18]

3.2.2.10 Ruedas desmontables

El método utilizado hasta ahora en varios diseños, especialmente en los de oruga, para poder desplazarse por las escaleras sin que las ruedas normales estorben consiste en desmontarlas y dejarlas colgadas de algún enganche diseñado para tal efecto.

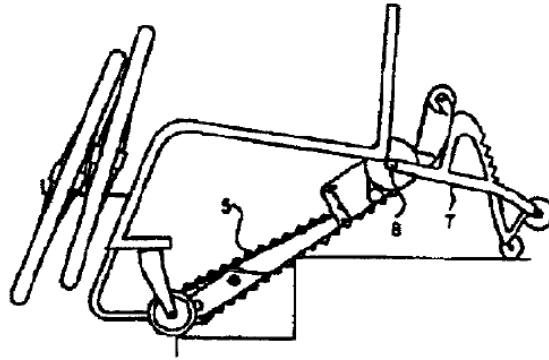


Ilustración 25 Ejemplo de ruedas desmontables; patente GB2433731A, obtenido de [19]

3.2.2.11 Mecanismos para deslizarse sobre el canto de los escalones

De esta solución se encontraron dos o tres casos. El mecanismo consiste en una superficie parecida a un ski. Con una superficie lo más deslizante posible permite el desplazamiento sobre el canto de los escalones con el menor rozamiento y esfuerzo posible. Frente a los mecanismos de oruga presenta la desventaja de ser una solución que por sí sola no aporta tracción. Tien la gran ventaja de ser una solución realmente sencilla y asequible.

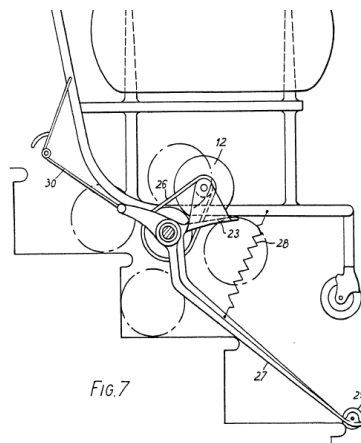


Ilustración 26 Ejemplo de superficie deslizante; patente GB2112330A, obtenido de [10]

3.2.2.12 Mecanismos de patas o muletas

Sistema de muletas articuladas a la silla de ruedas de manera que el usuario de la silla se impulsa con ellas directamente sobre la superficie de los escalones. Solución al problema similar al caso en el que el usuario se impulsa directamente con las manos sobre los escalones. Solución interesante y presente en muy pocas patentes hasta el momento.

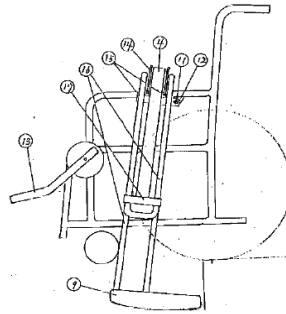


Ilustración 27 Ejemplo de muletas articuladas a la silla; patente JP11239589A, *obtenido de [20]*

3.2.2.13 Sistemas para mantener la silla horizontal durante el ascenso

Consistente por lo general en un cilindro neumático que accionándolo cambia la inclinación del asiento respecto a las ruedas o el apoyo correspondiente. Otra solución suele ser una pieza dentada por la cual se desplaza una guía que regula la inclinación del asiento. Este mecanismo de regulación de la inclinación de la silla suele estar presente en un gran número de diseños, su gran desventaja es que eleva la altura a la que se encuentra el asiento, y por consiguiente, el usuario. De esta forma se incrementa la peligrosidad al transitar por escaleras.

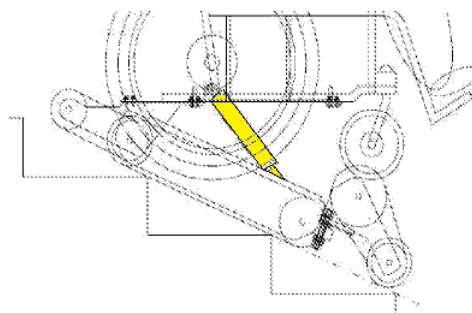


Ilustración 28 Ejemplo de regulación inclinación de asiento; patente KR20100084727A, *obtenido de [21]*

3.3 Dispositivos presentes en las sillas seleccionadas.

En la siguiente tabla se relatan los diferentes tipos de dispositivos especiales encontrados en las sillas de ruedas capacitadas para subir escalones, y se especifica cuáles están presentes en qué sillas, de las elegidas como muestra. En las casillas en las que aparece una X significa que el dispositivo está presente, la interrogación significa que ese dispositivo no es aplicable para esa silla y el espacio en blanco significa que no existe el dispositivo

Dispositivos Patentes	1. Dispositivos de oruga	2. Transmisión manual por manivela	3. Transmisión manual desde las ruedas	4. Sistema para cambio de apoyo	5. Ruedas especiales	6. Tracción por tornillo sin fin	7. Tracción directa mano escalón	8. Sistemas de acceso a las escaleras	9. Alineación de ruedas dentadas	10. Ruedas desmontables	11. Mecanismo para deslizar la silla	12. Mecanismo de patas o muletas	13. Niveladores de inclinación de la silla
1 CN2139437Y, [9]	X		X	X									
2 CN2461518Y, [7]	X	X						?					
3 CN2464305Y, [23]	X	X						?					
4 CN101003290A, [12]					X			?					
5 CN102204858A, [8]	X	X		X				?					
6 CN201005886Y, [14]		X		X		X		?					
7 CN201135560Y, [15]					X		X	X					X
8 CN201267580Y, [24]	X		X										
9 CN201492595U, [17]	X							X					
10 CN201642630U, [18]									X				
11 DE102006049711A1, [16]	X			X				X		X			
12 DE102009052253A1, [13]					X			X					
13 GB2112330A, [10]					X			X					
14 GB2433731A, [19]	X			X				X		X			
15 JP11239589A, [20]				X				X				X	
16 JP2001017480A, [11]					X			X					
17 JP2007125348A, [22]	X		X	X				X					X
18 KR20100084727A, [21]	X			X				X					X

Tabla 4 Dispositivos presentes en las sillas

De la anterior tabla podemos extraer algunas conclusiones.

El tipo de dispositivo más común es el que aporta un medio de acceso a los tramos escalonados, sea cual sea el tipo de silla este dispositivo es imprescindible para poder hacer uso de ella. El siguiente dispositivo más frecuente es el que permite el cambio de apoyo, que permite a la silla alternar el medio de tracción entre las ruedas y otro medio alternativo. Las soluciones que ofrecen el mismo medio de tracción siempre, como las sillas que funcionan siempre sobre la oruga, carecen de él. Los dispositivos menos comunes, que tan sólo aparecen en un diseño, son los mecanismos de tornillo sin fin (el dispositivo más singular de todos), el sistema de tracción mano escalón (el más importante en nuestro caso ya que parte de nuestro diseño se inspira en él), la alineación de ruedas dentadas y el mecanismo de muletas.

En la tabla podemos ver, además, que el diseño más completo es el que pertenece a la patente *JP2007125348A*, la número 17 en nuestra lista, ya que cuenta con un dispositivo de oruga, transmisión manual desde las ruedas, sistema para cambiar el apoyo, un medio de acceso a las escaleras y un medio para nivelar la inclinación de la silla.

3.4 Características deseables de las sillas de ruedas modificadas.

En este apartado se realiza un compendio de las características buscadas en las sillas de ruedas, a raíz del estudio de necesidades realizado y las conclusiones extraídas de este estudio.

3.4.1 Capaz de subir y bajar escaleras

Objetivo principal en torno al que se articula el proyecto. Todas las sillas de ruedas analizadas cumplen esta característica.

3.4.2 Autónoma

Otra de las características básicas del proyecto. En el mercado actual predominan los sistemas que para superar tramos escalonados necesitan la asistencia de una segunda persona.

3.4.3 Bajo coste económico

Característica innovadora, ya que la mayoría de investigaciones buscan un beneficio económico y, por lo tanto, los diseños están pensados para personas con cierto nivel adquisitivo. Esto se traduce en sistemas eléctricos y automatismos que encarecen considerablemente la silla.

3.4.4 Fácil de mantener, encontrar repuestos

Objetivo en la línea de realizar una silla asequible para todo el mundo y orientado especialmente a los usuarios de países subdesarrollados (refiriéndonos a la economía y la industria). En estos países no pueden acceder a un servicio de mantenimiento de la silla, ni pueden permitírselo, motivo por el cual muchas iniciativas de llevar productos tecnológicos a estos países fracasan.

3.4.5 Capaz de entrar y salir de los tramos de escalones

Característica que un porcentaje importante de las patentes existentes no cumplen. Estas patentes sólo se preocupan de la marcha por los escalones sin tener en cuenta las dificultades para empezar a subir o bajar, y para terminar de hacerlo.

3.4.6 Tracción manual

Característica básica del proyecto, ligado al objetivo de realizar una silla asequible para las personas con menos recursos económicos.

3.4.7 Ligereza

Factor importante para permitir su uso al mayor número de personas posible, debido a que la silla será impulsada por la fuerza propia del usuario. Cuanto más ligera sea ésta, menos fuerte habrá de ser el usuario y más gente será capaz de usarla.

3.4.8 Sencillez

Cuanto más sencilla menor será su costo y más factible fabricarla en talleres con pocos recursos.

3.4.9 Eficiencia energética

Importante por el mismo motivo que el de la ligereza. Cuanto menos energía sea necesaria para impulsarla más facilidades para el usuario. Esta energía se puede perder por rozamiento, por trayectos abruptos o por mecanismos flexibles.

3.4.10 Nivel de seguridad

Importante ya que la silla se empleará para salvar desniveles en tramos escalonados. Además se trata una herramienta para uso continuo y diario. Esta característica no está presente en todas las patentes, especialmente en las que tienen sistemas de patas o sistemas para regular la inclinación de la silla, pues la sitúan a una altura excesiva por encima de la superficie por la que circula.

3.4.11 Comodidad para el usuario

Importante en vistas de circular con ella durante largos periodos de tiempo y diariamente.

3.4.12 Impacto visual

Es bueno conseguir un diseño discreto y agradable a la vista, ya que gran parte de los diseños son excesivamente agresivos y aparatosos. Esto puede disuadir a la persona con discapacidad de utilizarla por no llamar la atención.

3.5 Análisis de cualidades de las sillas de ruedas.

En la siguiente tabla podemos ver una clasificación de las características de las sillas de ruedas según su presencia, o en qué medida las poseen, los diferentes diseños de la muestra.

Características Patentes	1. Capacidad para subir y bajar escaleras	2. Autónoma	3. Bajo coste	4. Repuestos	5. Abordar y salir de escaleras	6. Tracción manual	7. Ligereza	8. Sencillez	9. Eficiencia energética	10. Seguridad	11. Comodidad	12. Impacto visual
1 CN2139437Y	Sí	Sí	Medio	Medio	No	Sí	Medio	Malo	Bueno	Bueno	Bueno	Medio
2 CN2461518Y	Sí	Sí	Malo	Malo	Incompleto	Sí	Malo	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Medio
3 CN2464305Y	Sí	Sí	Medio	Medio	Incompleto	Sí	Medio	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Medio
4 CN101003290A	Sí	Sí	Bueno	Bueno	Incompleto	----- -----	Bueno	Bueno	Malo	Malo	Malo	Medio
5 CN102204858A	Sí	Sí	Malo	Medio	Incompleto	Sí	Medio	Malo	Bueno	Bueno	Bueno	Medio
6 CN201005886Y	Sí	Sí	Malo	Malo	Incompleto	Sí	Malo	Malo	Malo	Bueno	Bueno	Malo
7 CN201135560Y	Sí	Sí	Bueno	Bueno	Bueno	Sí	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Malo	Bueno
8 CN201267580Y	Sí	Sí	Medio	Medio	No	Sí	Medio	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Medio
9 CN201492595U	Sí	Si	Malo	Malo	Bueno	No	Malo	Malo	Bueno	Bueno	Bueno	Malo
10 CN201642630U	Sí	Si	Malo	Malo	Malo	No	Medio	Malo	Medio	Medio	Bueno	Bueno
11 DE102006049711A1	Sí	Sí	Bueno	Bueno	Sí	Sí	Bueno	Bueno	Medio	Bueno	Medio	Bueno
12 DE102009052253A1	Sí	Si	Malo	Malo	Sí	No	Malo	Malo	Malo	Medio	Bueno	Bueno
13 GB2112330A	Sí	No	Bueno	Bueno	Si	Sí	Bueno	Malo	Malo	Bueno	Bueno	Bueno
14 GB2433731A	Sí	Sí	Medio	Medio	Sí	Sí	Medio	Medio	Bueno	Bueno	Bueno	Medio
15 JP11239589A	Sí	Sí	Medio	Medio	Sí	Sí	Medio	Medio	Bueno	Medio	Medio	Medio
16 JP2001017480A	Sí	Sí	Medio	Medio	Si	No	Medio	Medio	Malo	Medio	Malo	Medio
17 JP2007125348A	Sí	Sí	Malo	Malo	Sí	No	Malo	Malo	Bueno	Bueno	Bueno	Malo
18 KR20100084727A	Sí	Sí	Malo	Malo	Sí	No	Malo	Malo	Bueno	Bueno	Bueno	Medio

Tabla 5 Características de las patentes

A la vista de esta tabla podemos ver que uno de los diseños que más destaca es el número 7, la patente *CN201135560Y*. Este diseño tiene capacidad para subir y bajar escaleras, es autónoma y de tracción manual, además tiene muy buenos valores en el resto de características, excepto en el de comodidad. A esta patente se le ha asignado un bajo nivel de comodidad porque sus ruedas de radios propician un avance muy abrupto por los escalones. Asimismo destaca la patente número 11, código *DE102006049711A1*, que tiene una valoración muy buena exceptuando nuevamente la comodidad, por el esfuerzo necesario para entrar en los tramos escalonados, y sobre todo por la eficiencia energética, al llevar un sistema de transmisión manual por manivela.

3.6 Compendio de opciones después del análisis.

Después del estudio de los dispositivos existentes y sus características, se seleccionaron algunos mecanismos entre los que elegir los más adecuados para nuestro diseño final. A continuación se presentan los mecanismos y las opciones que se consideraron interesantes de cada uno.

3.6.1 Mecanismo para trasladarse por los tramos escalonados.

- Sistema de oruga para trasladar la silla sobre los escalones.
- Sistema de ski, o apoyo deslizante para deslizarse sobre el canto de los escalones.

3.6.2 Mecanismo para cambiar el apoyo de la silla.

- Desplazando la oruga arriba y abajo, para dejar la oruga en el aire y la silla apoyada sobre las ruedas o viceversa.
- Desmontando las ruedas.

3.6.3 Mecanismo de tracción.

- Impulsándose directamente sobre los escalones con las manos.
- Montando un dispositivo de muletas para avanzar sobre los escalones.
- Mediante una transmisión por cadena desde las ruedas a la oruga correspondiente.

3.6.4 Mecanismo para acceder y salir de los tramos escalonados.

- Articulación de los extremos de la oruga para ajustar la inclinación de ésta a la de la escalera.
- Pata que haga subir la silla sobre los escalones.

3.6.5 Otros mecanismos que podrían contemplarse.

- Caso de ser tracción mano-escalón, un dispositivo para plegar el respaldo y que no estorbe al usuario mientras se impulsa.
- Caso de llevar oruga, un dispositivo de bloqueo en un sentido de giro. Para evitar caer hacia abajo precipitadamente durante la subida.
- Dispositivo de frenado para regular la velocidad al descender escalones.
- Cinturones de seguridad para sujetar al usuario a la silla, especialmente caso mano-escalón y muletas.
- Barras de seguridad que protejan al usuario en caso de precipitarse por los escalones.
- Posible relación de transmisión para plegar y desplegar las ruedas.

4 Decisiones del diseño

A la hora de tomar decisiones sobre el diseño se intentó cumplir con el mayor número posible de características de las analizadas en el apartado anterior. Se dio la mayor importancia a la capacidad de subir tramos escalonados, y por ello a su capacidad para entrar y salir de los tramos escalonados, y a su bajo coste, y por tanto a ser de tracción manual, para ser accesible al mayor número de personas posible.

4.1 Sobre el mecanismo para trasladarse

La primera decisión que se tomó sobre el diseño fue la de usar un sistema de oruga para trasladarse sobre los tramos escalonados. Antes de empezar el estudio de la técnica se pensó en la posibilidad de algún diseño de silla que caminara por medio de cuatro patas articuladas, pero esta elección en seguida se descartó por su poca viabilidad. Mientras se realizaba el estudio se barajó utilizar un sistema de estrella de ruedas, sin embargo, finalmente se vio que lo más práctico y eficiente sería una oruga.

Las orugas ofrecen un desplazamiento recto en la dirección de avance sin subidas y bajadas bruscas al paso por cada escalón, y un rozamiento mínimo.

4.2 Sobre el mecanismo para cambiar el apoyo de la silla.

La opción de hacer las ruedas desmontables se descartó desde el principio por resultar una opción lenta y aparatosa.

La idea inicial consistía en articular el brazo que soporta las ruedas principales para que girara en torno a su unión con el asiento hacia el frente y quedaran las ruedas de esta forma en el frente de la silla. Parecía una opción clara pero luego se vio que para que las ruedas quedaran lo suficientemente adelante, y no chocaran con los escalones, el brazo que uniera la rueda al resto de la silla habría de ser muy largo, de este modo la silla quedaría muy elevada cuando circulara sobre sus ruedas principales.

Finalmente se optó por un sistema propio no observado en ningún diseño anterior, la creación de una guía por la cual se desplazara el eje de ambas ruedas hacia la parte frontal de la silla. El funcionamiento detallado se verá más adelante.

4.3 Sobre el mecanismo de tracción y el mecanismo para acceder y salir de los tramos escalonados.

Tanto el modo de tracción como el modo de entrar y salir de los escalones se resolvieron conjuntamente con una sola idea.

Pensando siempre en un diseño lo más barato posible se barajaron las diferentes opciones de tracción manual. La mayoría de estos sistemas en los diseños anteriores consisten en transmisiones por cadena, de entre todos ellos se decidió que el que sería más sencillo de producir y por tanto más barato sería el que incorporara un piñón en el mismo eje de las ruedas, y que transmitiera la potencia a otro piñón montado en la oruga.

Posteriormente se empezó a estudiar cual sería el mejor método para abordar los tramos escalonados, parecía que la mejor opción sería la de añadir una pata trasera que permitiera elevar la silla para acceder al primer escalón en el ascenso, pero quedaban problemas sin resolver, como el inicio del descenso, que resultaba demasiado brusco.

Fue durante la búsqueda de una solución para entrar y salir de las escaleras cuando se decidió un diseño del que resultaba la silla más sencilla y económica posible, que resolvía el problema de la tracción, y el de la entrada y salida de los tramos escalonados. Este diseño obtendría la tracción mediante el impulso del usuario con sus manos directamente sobre los escalones y montaría una o varias orugas bajo el asiento. La clave de este diseño reside en que la oruga iría articulada al asiento en un solo punto, y esta articulación giraría de forma libre según se inclinara adelante o atrás el usuario.

5 Fase de diseño

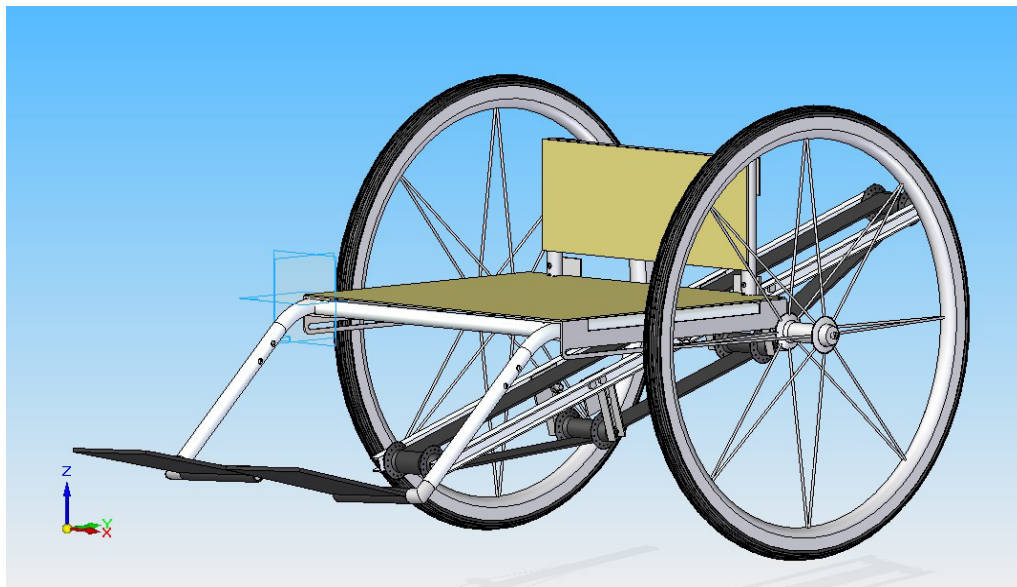


Ilustración 29 Imagen diseño propio

5.1 Definición del prototipo

El prototipo consiste en una silla de ruedas con una única oruga situada en la parte posterior de la silla y bajo el asiento, y cuyas ruedas principales pueden ser plegadas hacia la parte frontal durante el uso de la oruga. Durante los tramos llanos la silla funciona como una silla de ruedas convencional, mientras la oruga queda suspendida ligeramente inclinada bajo el asiento. Durante los tramos escalonados el usuario se impulsa por sí mismo aplicando las manos directamente a la superficie de los escalones. Mientras el usuario camina con las manos, su cuerpo y la silla se deslizan sobre la superficie por medio de la oruga. La esencia del prototipo radica en que esta oruga está articulada en torno a un único eje respecto de la silla, lo que permite al usuario inclinar la silla a voluntad sin necesidad de complejos mecanismos, desplazando su peso corporal hacia el frente o hacia la parte posterior. La importancia de esta articulación radica también en la solución que ofrece a uno de los mayores problemas que encuentran las sillas de ruedas que incorporan sistemas de oruga, la entrada y salida de los tramos escalonados.

En el siguiente apartado se detalla el funcionamiento tanto en subida como en bajada. Los puntos con el subíndice M indican dónde estarían situadas las manos ofreciendo tracción. Las flechas que parten de estos puntos indican la dirección y sentido de la fuerza aplicada por el usuario.

5.1.1 Funcionamiento en subida

- **Fase subida 1**

El usuario se aproxima a el tramo escalonado sobre las ruedas principales y avanzando marcha atrás. Durante la aproximación, la oruga queda suspendida bajo el asiento y el usuario empuja las ruedas como en una silla de ruedas convencional. El eje de las ruedas está bloqueado en la parte posterior de la guía pero con libertad de giro.

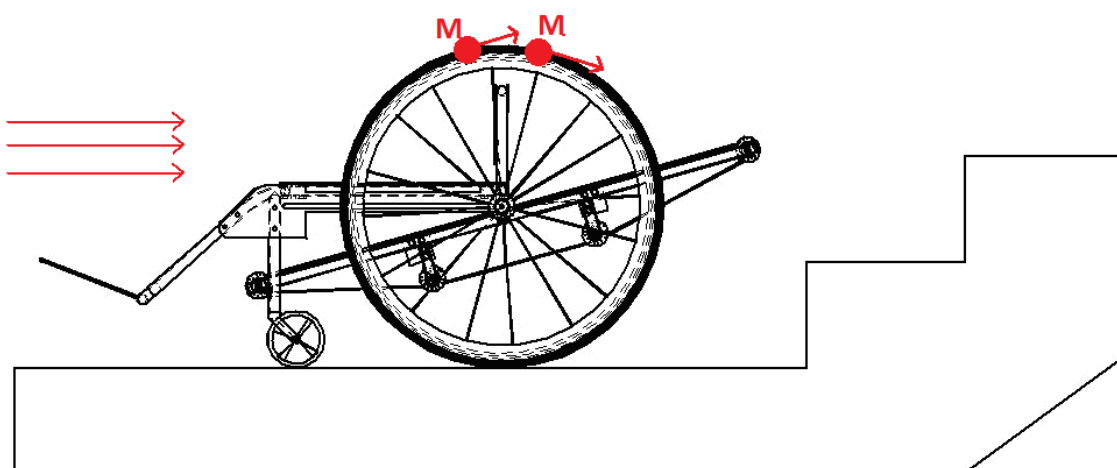


Ilustración 30 Subiendo fase 1

- **Fase subida 2**

Al llegar al inicio del tramo escalonado el usuario desbloquea el eje de las ruedas para que estas se puedan desplazar hacia el frente de la silla. Seguidamente se apoya sobre las ruedas levantando ligeramente su peso del asiento e impulsa las ruedas hacia el frente, al mismo tiempo que el asiento se desplaza hacia atrás, de esta forma el peso recae sobre la oruga que queda apoyada sobre los primeros escalones. Inmediatamente después el usuario apoya sus manos sobre los primeros escalones y bloquea las ruedas en esta nueva posición.

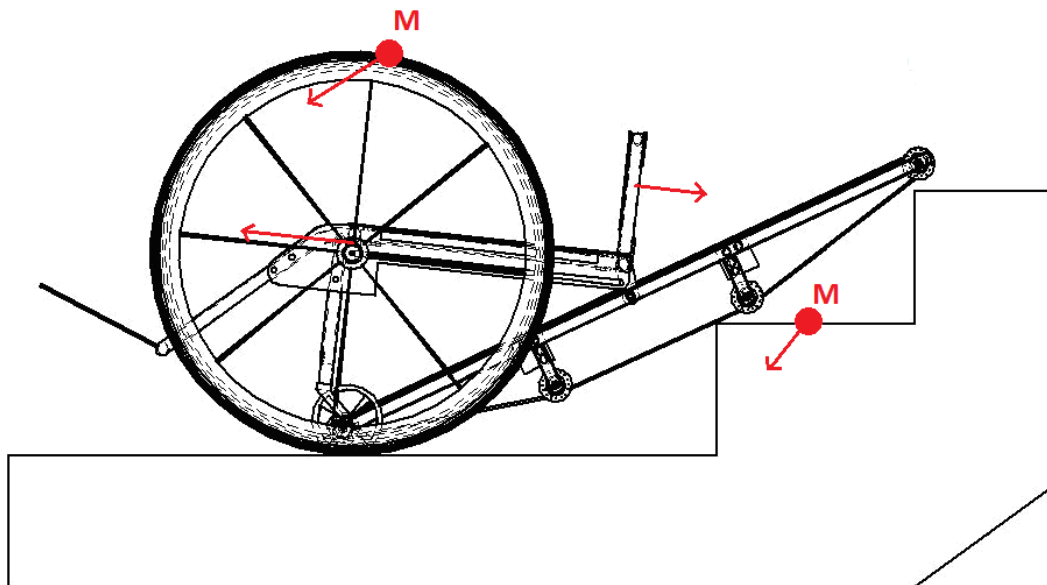


Ilustración 31 Subiendo fase 2

- **Fase subida 3**

Teniendo las manos afirmadas en la superficie de los primeros escalones, el usuario inclina su cuerpo hacia atrás quedando tanto el asiento como las ruedas en el aire. Seguidamente comienza a caminar con los brazos, impulsándose con las manos sobre los escalones.

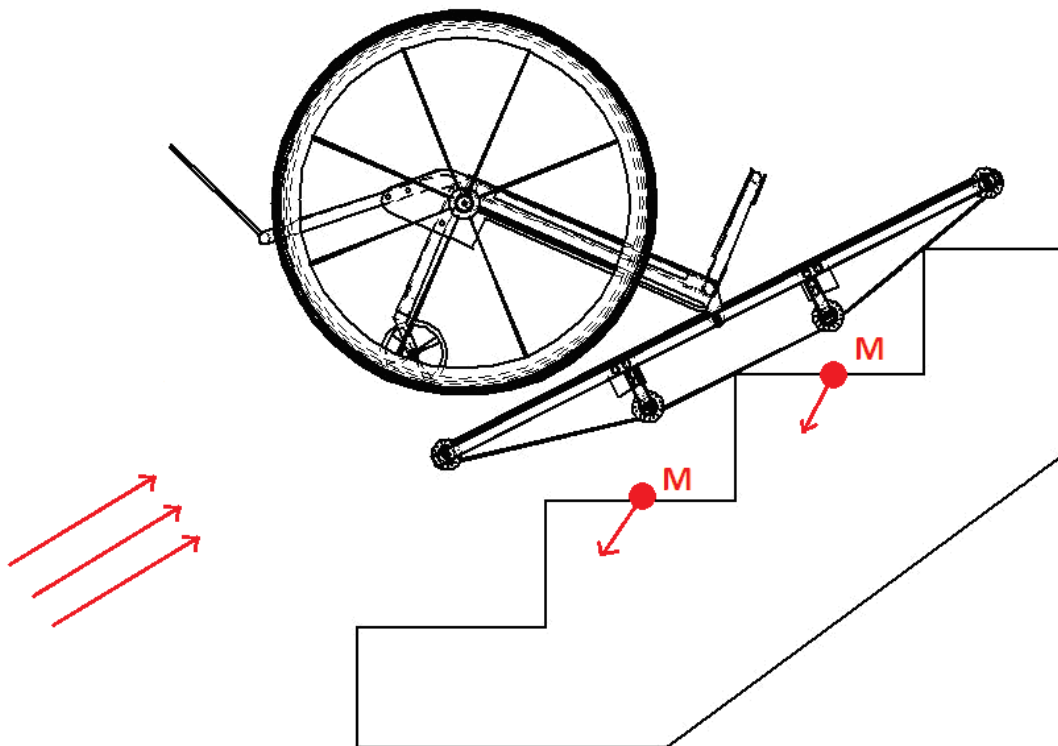


Ilustración 32 Subiendo fase 3

- **Fase subida 4**

Al llegar al final del tramo escalonado, y gracias a la articulación de la oruga, el usuario puede continuar caminando con los brazos hasta quedar la silla completamente apoyada en la superficie horizontal. Seguidamente el usuario desbloquea las ruedas y realiza un movimiento inverso al que hizo para pasar de las ruedas a al oruga. Tirando de las ruedas hacia atrás e impulsándose sobre el suelo, de un impulso, el usuario eleva su cuerpo y pasa su peso de la oruga a las ruedas. A continuación bloquea el eje de las ruedas en esta posición.

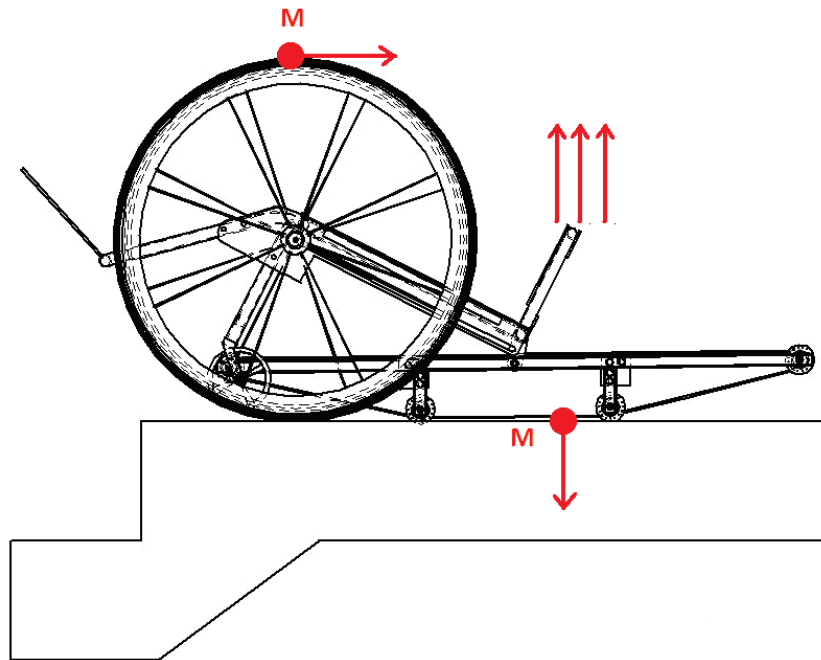


Ilustración 33 Subiendo fase 4

- **Fase subida 5**

Una vez en la posición habitual el usuario continúa la marcha como en una silla de ruedas estándar.

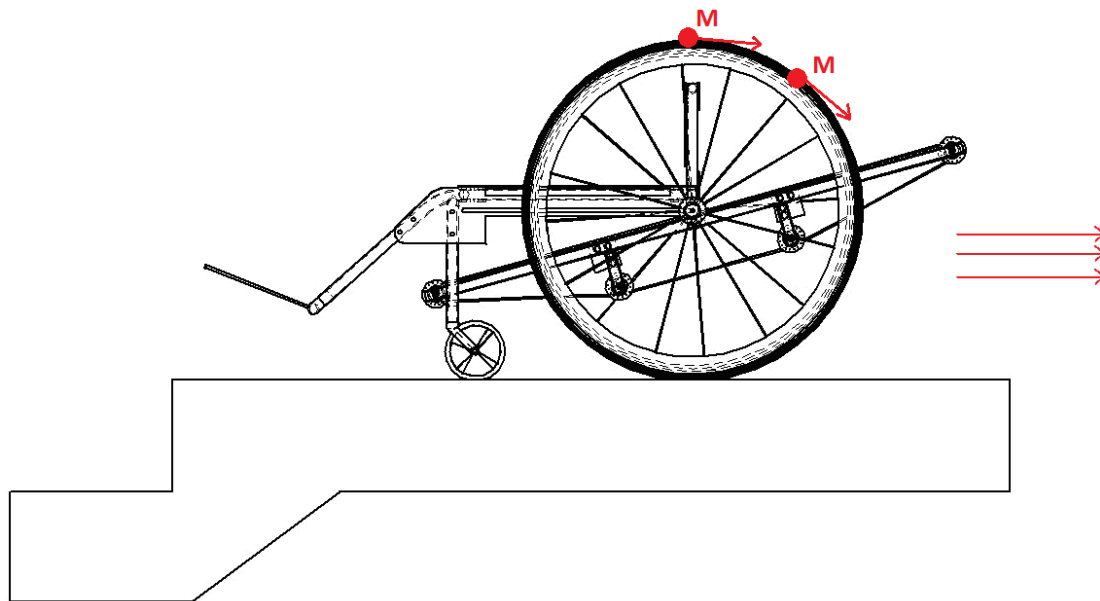


Ilustración 34 Subiendo fase 5

5.1.2 Funcionamiento en bajada

- **Fase bajada 1**

El usuario se aproxima a los escalones avanzando marcha adelante como en una silla de ruedas convencional.

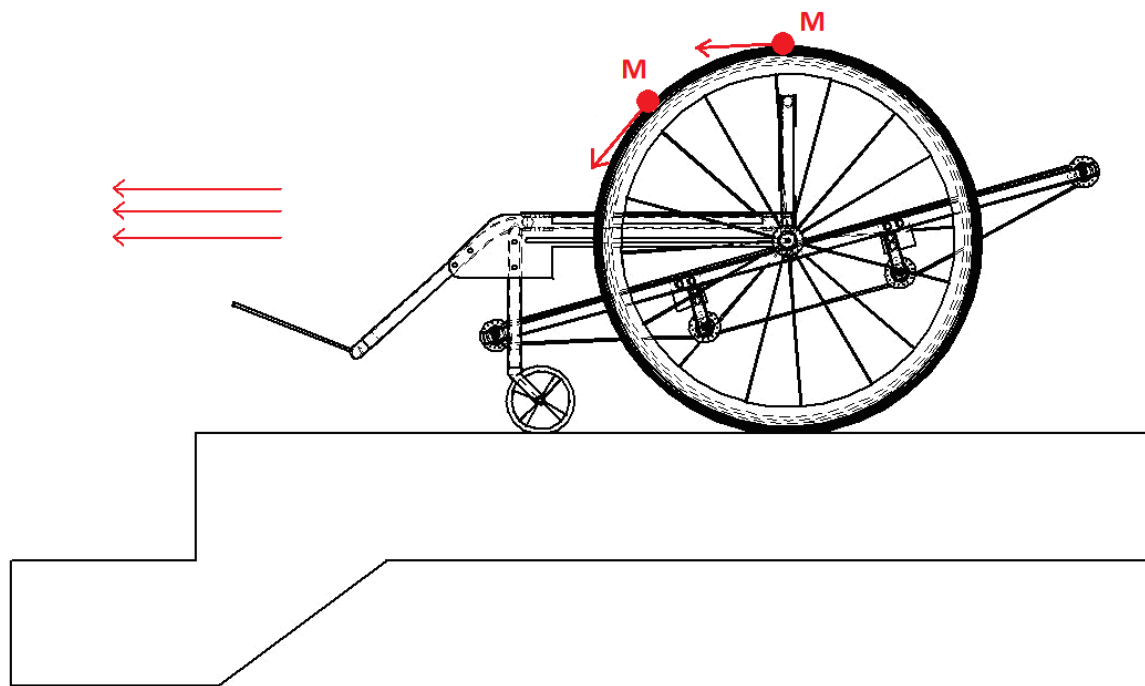


Ilustración 35 Bajando fase 1

- **Fase bajada 2**

El usuario desbloquea el eje de las ruedas y realiza igual maniobra que la detallada para pasar de las ruedas a la oruga antes de iniciar el proceso de subida, dejando esta vez que la silla caiga hasta quedar la oruga apoyada en el suelo. A continuación vuelve a bloquear el eje de las ruedas en esta nueva posición y, gracias a la articulación de la oruga, comienza a caminar con las manos sobre el suelo llano para continuar después caminando con las manos sobre los escalones.

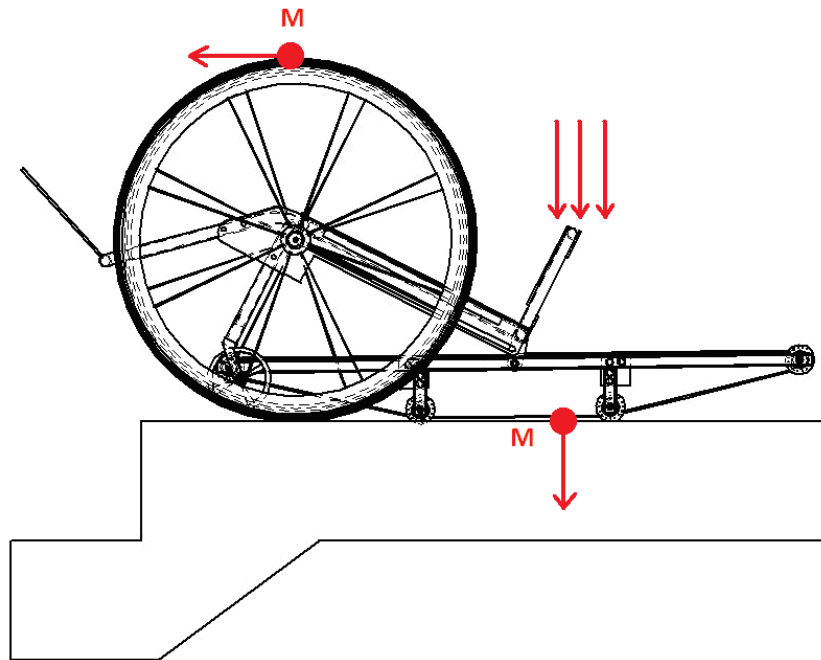


Ilustración 36 Bajando fase 2

- **Fase bajada 3**

Comienza el descenso sobre la oruga caminando, al igual que en el ascenso, con sus manos sobre los escalones.

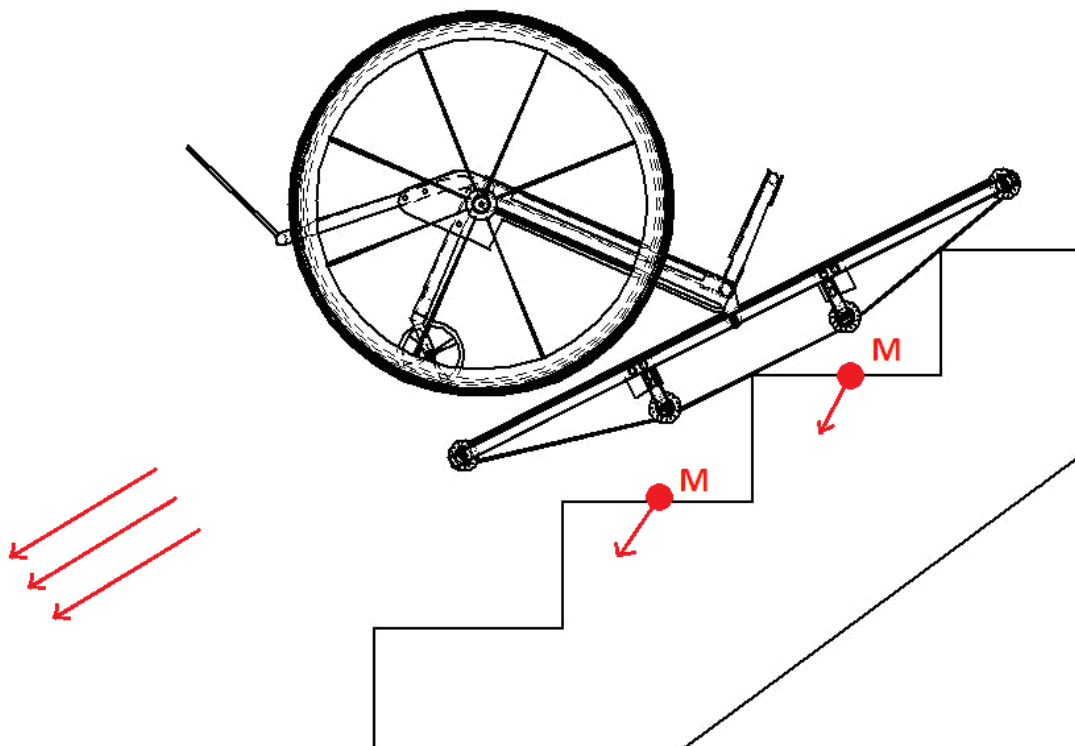


Ilustración 37 Bajando fase 3

- **Fase bajada 4**

Gracias a la articulación de la oruga el usuario continúa caminando con las manos hasta quedar en el suelo horizontal aún sobre la oruga. El usuario desbloquea nuevamente el eje de las ruedas y realiza igual maniobra que la detallada en el ascenso para pasar de nuevo de la oruga a las ruedas. Seguidamente vuelve a bloquear el eje de las ruedas en la posición trasera para poder continuar la marcha.

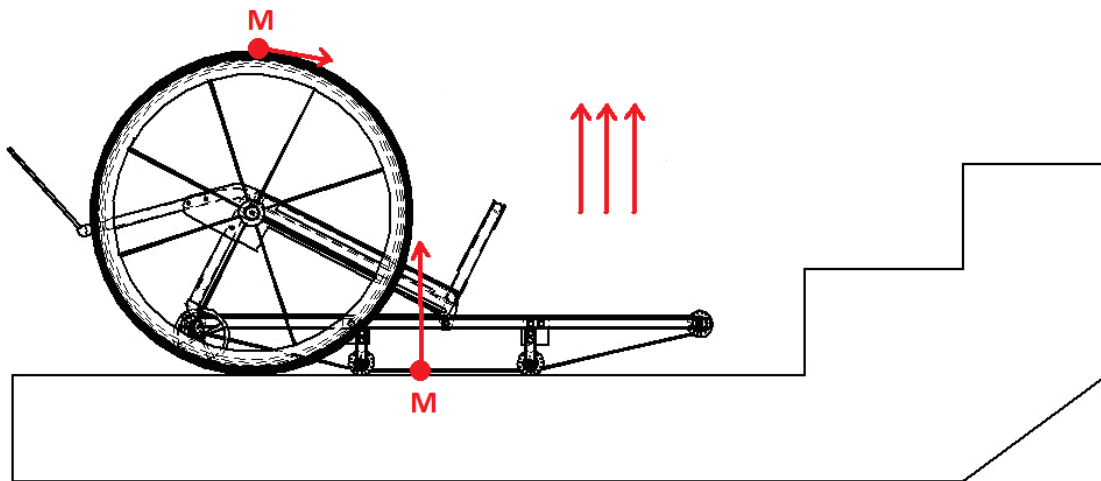


Ilustración 38 Bajando fase 4

- **Fase bajada 5**

El usuario continúa la marcha hacia adelante como en una silla de ruedas convencional.

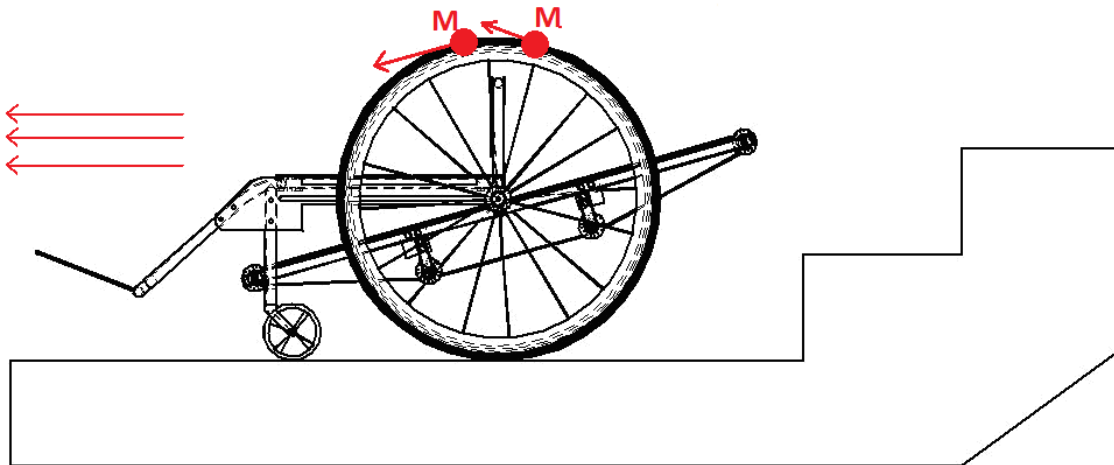


Ilustración 39 Bajando fase 5

5.2 Relación de piezas del diseño:

Todos los planos de las piezas se adjuntan en formato electrónico.

5.2.1 Oruga

1. Buje bicicleta x4 [Plano 1]
2. Correa x1
3. Chasis:
 - a. Perfil 1000 x2 [Plano 2]
 - b. Perfil 75 x4 [Plano 3]
 - c. Chapa unión oruga x4 [Plano 4]
 - d. Chapa articulación x2 [Plano 5]
 - e. Vástago 120 Ø 4 x4 [Plano 6]
 - f. Vástago 120 Ø8 x1 [Plano 7]
 - g. Tornillo 30 Ø8 x16 [Plano 8]
 - h. Tuerca Ø4 x8 [Plano 9]
 - i. Tuerca Ø8 x22 [Plano 10]
 - j. Arandela Ø4 x8 [Plano 11]
 - k. Arandela Ø8 x4 [Plano 12]

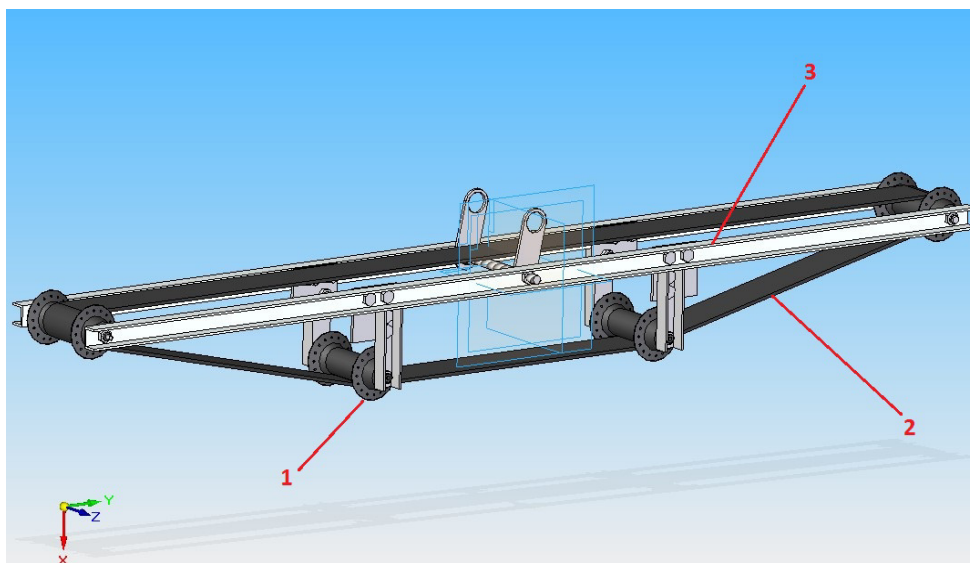


Ilustración 40 Diseño oruga por ordenador

5.2.2 Asiento

1. Guía ruedas x2 [Plano 13]
2. Chapa unión asiento x2 [Plano 14]
3. Barra lateral asiento x2 [Plano 15]
4. Reposa pie x2 [Plano 16]
5. Bisagra reposapiés x2 [Plano 17]
6. Barra rueda secundaria x2 [Plano 18]
7. Barra asiento delantera x1 [Plano 19]
8. Barra asiento trasera x1 [Plano 20]
9. Barra superior respaldo x1 [Plano 21]
10. Barra lateral respaldo x2 [Plano 22]
11. Tornillo 30 Ø8 x40 [Plano 9]
12. Tuerca Ø8 x42 [Plano 11]

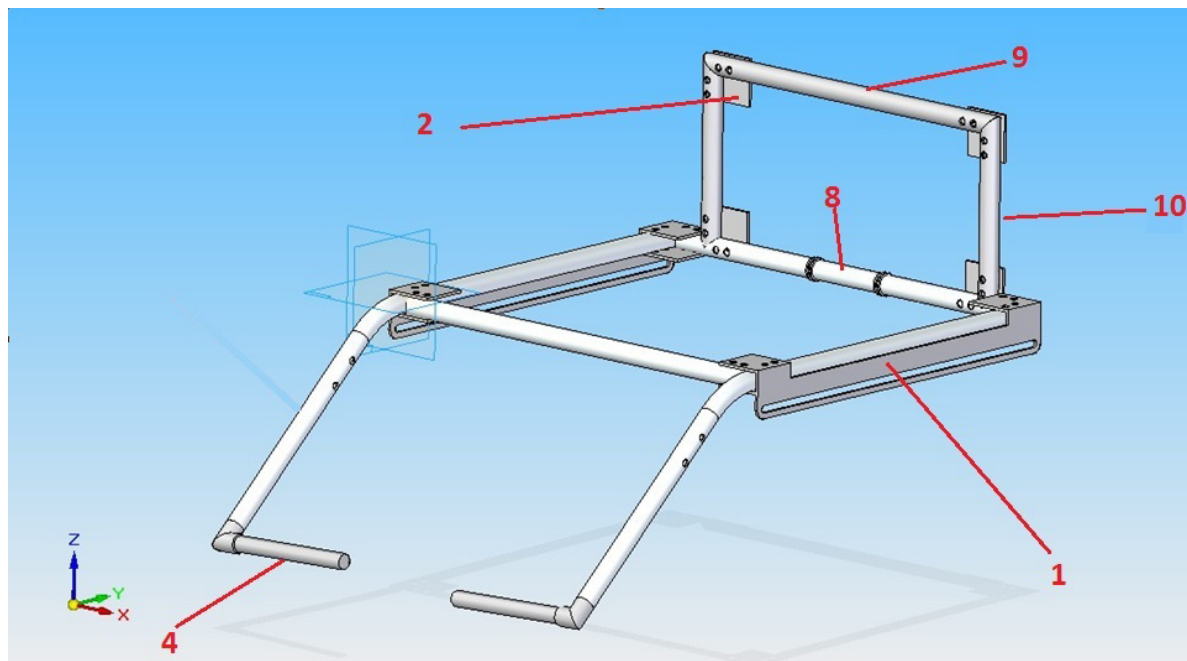


Ilustración 41 Diseño chasis por ordenador

5.2.3 Ruedas principales

El plano de las ruedas principales [Plano 23] se adjunta en forma de plano de conjunto ya que la rueda no ha sido diseñada específicamente para esta silla de ruedas, sino que se ha cogido una rueda de bicicleta, de dimensiones ya definidas.



Ilustración 42 Rueda principal en isométrico

5.2.4 Ruedas secundarias

Los planos de las ruedas secundarias [Plano 24] se presentan igualmente de conjunto ya que no han sido diseñadas específicamente para esta silla de ruedas, sino que son ruedas estándar existentes ya en el mercado.

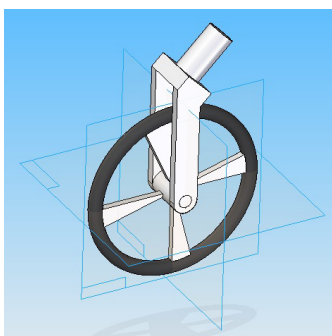


Ilustración 43 Rueda secundaria en isométrico

5.3 Análisis geométrico del primer diseño:

Si bien algunas medidas de la silla de ruedas son estándar y similares a la mayoría de sillas de ruedas, como pueden ser las dimensiones del asiento, muchas otras medidas son específicas para este prototipo y tienen su razón de ser en las funciones especiales que desempeña la silla de ruedas.

5.3.1 Respaldo.

Tras realizar el estudio de la técnica y estar definido el modo en el que iba a ser usada la silla de ruedas, se decidió que el respaldo debía tener un diseño especial para no entorpecer los movimientos de los brazos en el avanzar por los tramos escalonados.

Para caminar sobre los escalones con las manos el usuario ha de realizar un movimiento de vaivén pasando los brazos repetidamente junto a sus costados. Para solucionar esta dificultad se encontraron cinco posibles soluciones.

1. Utilizar un respaldo de baja altura que permitiera el paso de los brazos por encima de éste.
2. Utilizar un respaldo especialmente estrecho que permitiera el paso de los brazos por los laterales de éste.
3. Utilizar una combinación de respaldo bajo y estrecho.
4. La realización de un respaldo plegable que durante los tramos escalonados se encuentre plegado o desmontado.
5. La ausencia de respaldo.

Finalmente se optó por diseñar un respaldo de baja altura, basándose en la técnica de las sillas de ruedas existente hasta la fecha. Se vio que actualmente existen diversos modelos con respaldo de dimensiones mínimas. Estos modelos son los que pertenecen al campo de las sillas de ruedas deportivas.

Algunos ejemplos:

Sillas de ruedas para la práctica de baloncesto.



Ilustración 44 Silla de ruedas para baloncesto

Sillas de ruedas para uso en parques de *skateboarding*.



Ilustración 45 Silla de ruedas acrobática

5.3.2 Ruedas principales

En el marco de realizar una silla de ruedas de bajo presupuesto y utilizar en la medida de lo posible materiales reciclados, o al menos de precio asequible, se decidió usar como ruedas principales ruedas de bicicleta. En un principio se decidió usar ruedas de bicicleta *Mountain Bike* estándar. Sin embargo, durante la fase de diseño apareció un obstáculo, y es que éstas ruedas tenían un diámetro demasiado grande y aún plegadas en la parte frontal de la silla chocaban con los escalones y obstaculizaban el desplazamiento por los tramos escalonados.

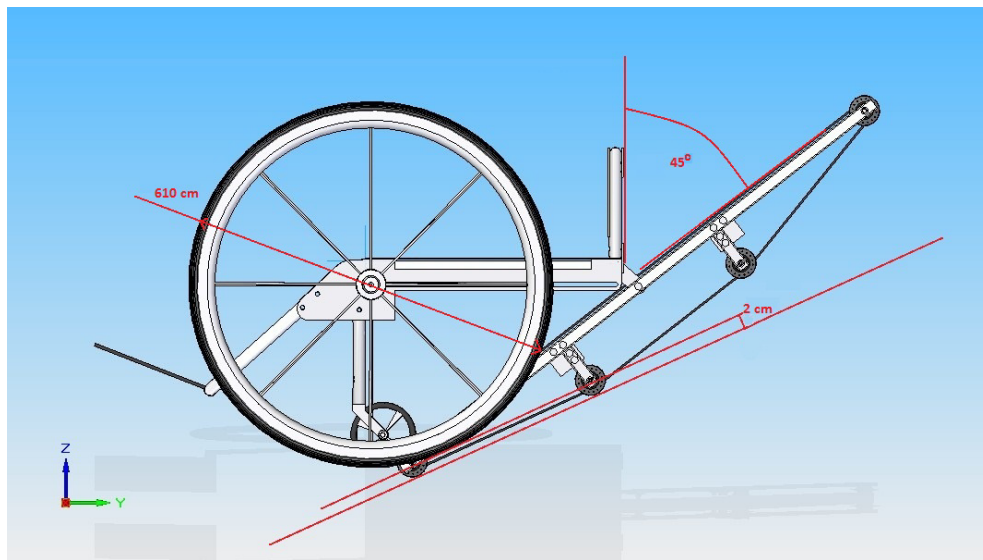


Ilustración 46 Razones trigonométricas

En la figura, la recta inferior delimita el plano superior del tramo escalonado en la posición de mayor aproximación a las ruedas principales. La recta superior es la paralela tangente a las ruedas principales en su punto más próximo al plano de las escaleras. Se tomaron 2 cm de seguridad entre rueda y escalón en su punto más crítico.

El diámetro de 610 cm de rueda permite un ángulo relativo mínimo de 45 grados entre la parte inferior del asiento y la oruga (o lo que es lo mismo entre el respaldo y la oruga). Este ángulo de 45 grados se considera el mínimo que se podría llegar a alcanzar durante el uso de la silla de ruedas. Un ángulo menor significaría la precipitación del usuario hacia el frente.

Haciendo uso de un asiento y así una pieza guía de mayores dimensiones, se podría usar una rueda de mayor tamaño, sin embargo un asiento mayor resultaría de un tamaño excesivo.

5.3.3 Pieza guía de las ruedas principales.

- Esta complicada pieza cumple cinco funciones principales:
 - Unir las barras laterales del asiento a las barras frontal y trasera del mismo.
 - Unir las patas de las ruedas secundarias a las barras laterales del asiento.
 - Soportar los esfuerzos que recaen sobre las patas de las ruedas secundarias y sobre los brazos de los reposapiés.
 - Unir las ruedas principales al resto de la estructura y soportar sus esfuerzos.
 - Permitir el desplazamiento de las ruedas principales desde la parte posterior de la silla a su parte frontal.
- En las siguientes imágenes podemos ver el diseño de nuestro prototipo y el de una silla de ruedas estándar.

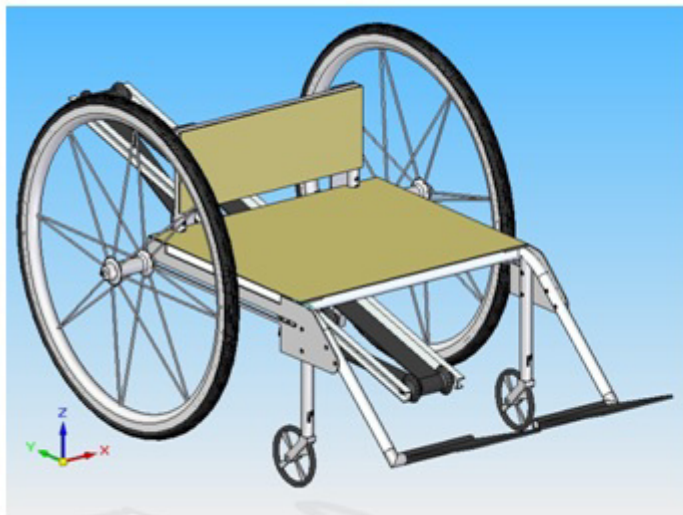


Ilustración 47 Comparación sillas de ruedas

En estas imágenes vemos que las dimensiones de la pieza guía despejan toda la zona bajo el asiento, para que al deslizarse las ruedas delanteras hacia el frente no quede ninguna parte de la silla que pueda chocar contra los escalones.

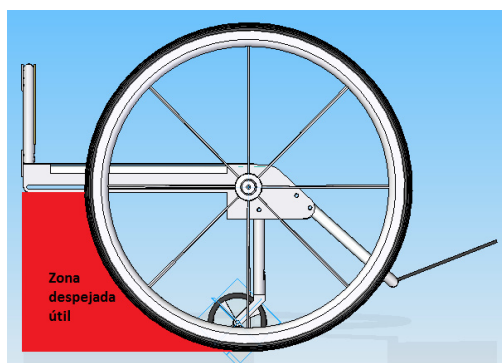


Ilustración 48 Muestra zona libre para los escalones

- Las dimensiones específicas de la pieza guía cumplen un cometido concreto.



Ilustración 49 Esquema pieza guía

- La altura a la que se encuentra la guía es la mínima posible que permite que el eje de las ruedas no choque con las barras del asiento. La distancia de la guía, y por consiguiente el eje de las ruedas, al asiento a de ser mínima para facilitar la recuperación de la postura normal en la silla de ruedas. Es decir, facilitar el movimiento por el cual el usuario ha de desplazar la rueda desde el frente del asiento hasta la parte posterior de él, cargando de nuevo su peso sobre las ruedas principales.

En la siguiente imagen se ve la silla en la posición en la que el usuario carga el cuerpo sobre la oruga. Como se aprecia en la imagen, para recuperar su posición normal el usuario tendrá que desplazar su peso una distancia de 18 cm en dirección vertical.

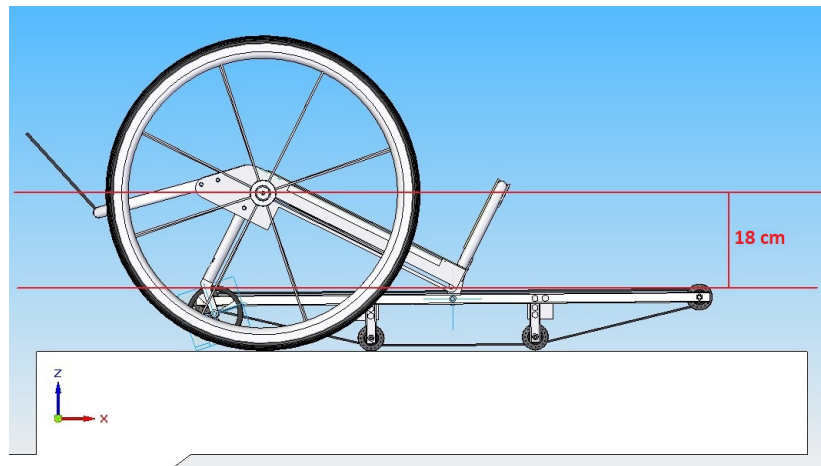


Ilustración 50 Razones trigonométricas pieza guía

En la siguiente imagen la rueda se ha desplazado hacia atrás y el usuario ha cargado su peso sobre las ruedas.

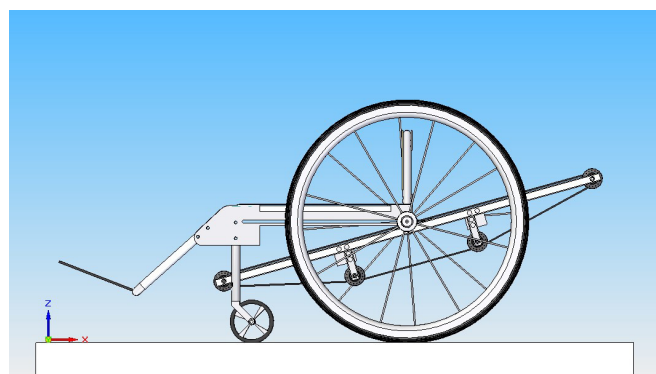


Ilustración 51 Silla en reposo

- La longitud de la hendidura viene definida por otras dos dimensiones características de la silla, la longitud del asiento, elegido de medio metro como medida estándar y, principalmente, la dimensión de las ruedas. Las dimensiones de la rueda y de la longitud de la guía son dependientes la una de la otra, así, se podría contemplar el uso de una rueda mayor con una pieza guía más larga sin que la rueda chocara con los escalones durante el uso de la oruga.

5.3.4 Oruga

- Para la realización del chasis se utilizaron perfiles en forma de C, por ser una estructura propicia para aguantar esfuerzos y momentos y ser asimismo lo más ligera posible.
- Para las medidas de la oruga, la distancia entre poleas y número de éstas había que definir primero para qué tipo de escalones sería apta la silla. Para este primer diseño se tomó como modelo de escalones el abanico de ellos que contempla la legislación española, como vimos en el estudio de obstáculos, apartado 2.3.
- El mayor problema se presenta en los casos de los escalones más grandes, con la mayor distancia entre el canto de un escalón y el siguiente. Este caso se da cuando tanto la huella como la contrahuella son máximas.

Partiendo de la contrahuella máxima con la que presuntamente se encontrará el usuario $C=18,5$ cm.

$$2C + H \leq 70 \text{ cm} \rightarrow 2*18.5 + H \leq 70 \text{ cm} \rightarrow H \leq 33 \text{ cm}$$

Luego el escalón máximo tendrá como medidas $C=18,5$ cm y $H=33$ cm

Si $D^2 = H^2 + C^2$ entonces $D = \sqrt{H^2 + C^2}$; $D = 37,83$ cm.

La máxima distancia que habrá de superar la oruga entre dos escalones será de 37,83 cm.

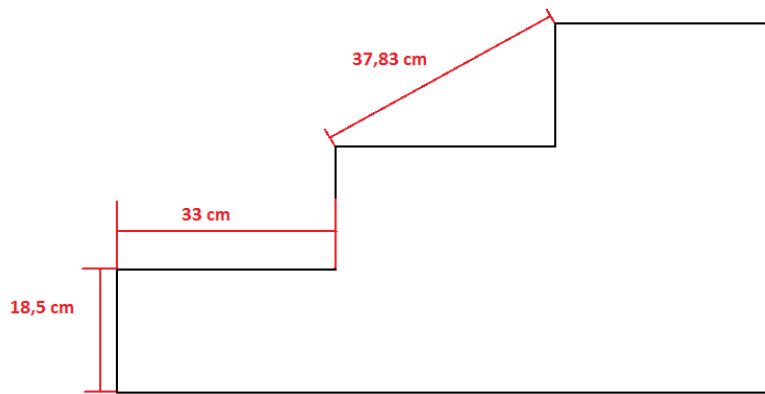


Ilustración 52 Dimensiones escalones

Luego para garantizar que la oruga quedara apoyada en todo momento en, al menos, dos escalones, la longitud de oruga habría de ser mayor que dos veces la distancia entre el canto de dos escalones consecutivos.

Siendo **L** la longitud total de la oruga:

$$L \geq 2D \rightarrow L \geq 74cm$$

Por otra parte, para evitar una deformación excesiva de la correa de la oruga, y para garantizar un deslizamiento óptimo sobre los escalones, se necesitaba que la distancia entre rodillo y rodillo de la oruga fuera menor que la distancia entre dos cantos consecutivos de los escalones, de esta forma se evitaba que dos escalones pudieran incidir en el mismo vano entre rodillo y rodillo de la oruga.

Siendo **l** la longitud entre dos rodillos consecutivos de la oruga:

$$l \leq 37cm$$

Debido a que la silla es de tracción manual, tanto sobre llano como sobre tramos escalonados, interesaba que fuera lo más ligera posible, por ello se trataría de hacer con el número mínimo de ejes.

Caso de hacer la oruga de 3 ejes y dadas las restricciones, esta tendría que ser exactamente de $L=74$ cm y $l=37$ cm (si la l fuera menor no alcanzaría la L mínima de 74 cm), lo cual estaría en el límite de mínima longitud de oruga y de máxima distancia entre ejes, no sería práctico ni fiable.

Caso de hacer la oruga de 4 ejes y eligiendo la 1 máxima posible tendríamos $L_{\max} = 37 \times 3 = 111 \text{ cm}$. Con lo cual $74 \text{ cm} \leq L \leq 111 \text{ cm}$.

Eligiendo dentro de este intervalo la medida estándar $L=100 \text{ cm}$ tendríamos $l=33,33 \text{ cm}$, por lo tanto se cumpliría:

$$74 \text{ cm} \leq L \leq 111 \text{ cm}$$

$$0 \leq l \leq 37 \text{ cm}$$

Por todo ello la longitud final elegida fue de **$L=100 \text{ cm}$** y el número de ejes **$N=4$** , dos en los extremos y dos intermedios.

- En el afán de realizar una silla con el mínimo presupuesto posible y capaz de ser realizada con la mayor facilidad posible, para los ejes de la oruga se eligieron bujes de bicicleta. Por ello algunas características geométricas de las poleas de la oruga vinieron definidas por los bujes utilizados. Éstos bujes son los ejes de las ruedas de las bicicletas, los utilizados para realizar el prototipo se obtuvieron de bicicletas usadas en talleres de bicicletas sin coste alguno.

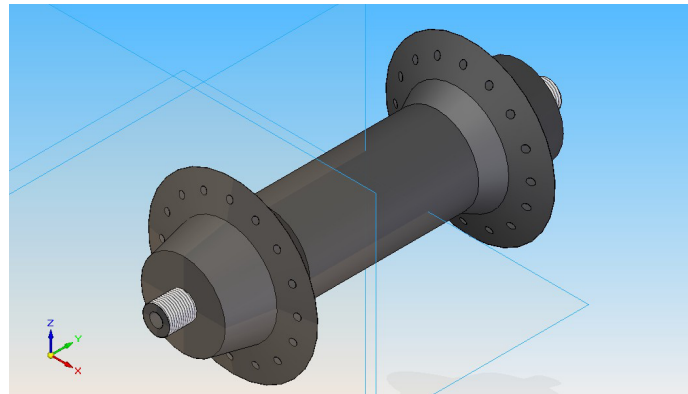


Ilustración 53 Buje rueda bicicleta

6 Construcción de un prototipo

La fase de construcción de un prototipo estuvo marcada por dos factores importantes. Se intentaba lograr un prototipo de **silla de ruedas capaz de subir y bajar tramos escalonados** de manera autónoma, y que a su vez fuera **de bajo presupuesto** para poder atender la enorme demanda en los países menos desarrollados. Estas dos características fueron fructíferas y fundamentales para decidir y diseñar el mecanismo final que se intentaría construir, sin embargo, en la fase de fabricación cumplir con estos dos requisitos ha sido constantemente confuso y contradictorio en cuanto a la toma de decisiones se refiere. Factores importantes durante la fase de diseño:

- Todo el proceso de fabricación se realizó en un garaje propio y utilizando herramientas corrientes. Esto se debe al interés en fabricar una silla capaz de ser fabricada por cualquier persona y con los recursos mínimos posibles.
- Para la adquisición de los materiales se hizo todo lo posible por emplear el mínimo presupuesto posible. Esta decisión significó utilizar piezas de bicicletas de segunda mano. Se eligieron piezas de bicicleta por estar estas presentes en todo el mundo y tener un coste bajo. Existen actualmente varias iniciativas en las que se fabrican sillas de ruedas con ruedas de bicicletas [25] e incluso algunas que utilizan también sillas de jardín [26].
- En todo momento se buscó hacer un diseño completamente desmontable y que esto se pudiera hacer con herramientas comunes, para facilitar el mantenimiento por parte de cualquier persona. Este hecho descartaba cualquier tipo de soldadura, lo cual habría simplificado enormemente el proceso.
- La silla había de ser lo más ligera posible, por ser propulsada por la fuerza humana, por ello todas las piezas estructurales se fabricaron de aluminio.
- Los materiales comprados habían de adquirirse en establecimientos no especializados, en vistas de utilizar piezas comunes y accesibles.

6.1 Primera construcción

6.1.1 Proceso de construcción

Se realizó siguiendo las directrices fundamentales del diseño pero realizando simplificaciones debido a lo costoso de la fabricación de un prototipo. Antes que nada se intentaría fabricar el asiento con la oruga, para comprobar si el método elegido sería viable. Por ello en la construcción no se incluyó ni la guía para las ruedas ni las ruedas, tanto las principales como las secundarias. Una vez se consiga una solución óptima para circular sobre las escaleras se podrá abordar la construcción de un sistema de plegado de ruedas.

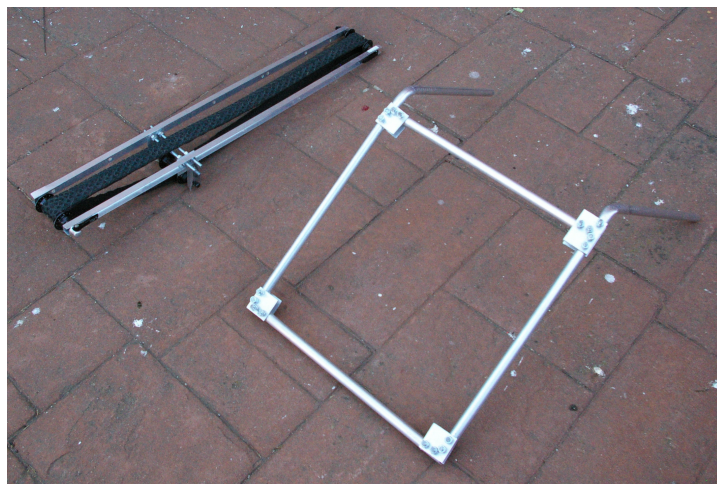


Ilustración 54 Oruga y chasis primer prototipo

- **Construcción del chasis**

El chasis se construyó con tubos de aluminio de un milímetro de espesor y chapas de aluminio de 2 mm. Las dificultades en este punto se debieron a:

- Realizar taladros en tubos de aluminio sin una torre que guíe el taladro de forma perfectamente vertical resulta completamente ineficaz. Todos los agujeros que se realizaron tenían muy poca precisión, generando esto muchísimas dificultades a la hora de introducir los tornillos correspondientes. Principalmente por las diferencias de posición entre el agujero de entrada y el de salida.

- Al realizar los agujeros en las chapas igualmente se cayó en errores de precisión. El cometido de éstas era la unión de los diferentes tubos, por este motivo frecuentemente los tubos no encajaban entre sí o se producían holguras.
- La curvatura del tramo que sostiene las piernas del usuario se realizó con la ayuda de un pequeño soplete doméstico y unos sargentos, sin embargo se produjeron desvíos de la curvatura inicial y además se produjo una fisura en uno de los tubos.

En las imágenes se muestra la fisura producida por concentración de tensiones en un taladro durante el mecanizado del tubo y el resultado final del proceso de doblado.



Ilustración 55 Fisura y aspecto mecanizado

- **Construcción de la oruga**

Sin lugar a dudas esta fue la parte más complicada de todo el proceso de fabricación.

En el afán de realizar la silla de ruedas con piezas recicladas se intentaron numerosos diseños utilizando diferentes piezas como ejes de la oruga y como correa.



Ilustración 56 Oruga primer diseño

- **Correa:**

Se utilizaron diferentes cubiertas de ruedas de bicicletas usadas, a las que se les extrajo los anillos metálicos que mantienen la forma circular y buena parte del material de los lados, dejando exclusivamente la banda de rodadura. Así mismo, se probó a utilizar una válvula de bicicleta de carretera, y se intentó abrir una manguera de riego a lo largo para obtener así una cinta de material.

Algunas imágenes de las piezas utilizadas como correa:



Ilustración 57 Elementos utilizados como correa

- **Ejes:**

Se probaron diferentes piezas recicladas: ruedas de patinetes de diferentes tamaños, ruedas de monopatines, ejes de ruedas de bicicleta (bujes) e incluso una rueda de monopatín mecanizada en forma de polea.



Ilustración 58 Elementos utilizados como ejes



Ilustración 59 Rueda mecanizada y buje bicicleta

- **Pieza unión chasis-oruga**

Se realizaron dos piezas a medida en aluminio para articular la oruga al asiento de la silla. En torno a estas piezas se colocaron anillas de sujeción para evitar que se desplazaran axialmente respecto a la barra del asiento.



Ilustración 60 Pieza de articulación

- **Construcción del respaldo**

Una vez construido el asiento y la oruga, y tras la primera toma de contacto, se vio que en el movimiento de los brazos los codos habían de pasar inevitablemente muy cerca de la superficie del asiento. Tras un periodo de reflexión se vio que de momento el respaldo no era imprescindible y que realizar un respaldo plegable resultaría muy complicado, por ello se le dio prioridad al estudio de la viabilidad de la oruga mono-articulada.

6.1.2 Ensayos sobre la primera construcción

- **Ensayos sobre el banco de trabajo**

La mayoría de los intentos se realizaron con diferentes cubiertas de bicicleta usadas, sin embargo no se logró ninguna opción que fuera realmente eficiente. Las propiedades elásticas de la cubierta dieron diferentes problemas ya que al aplicar tensión a la cubierta ésta se combaba. Cuando se simulaba el movimiento de la correa sin tensión, ésta funcionaba fluidamente, sin embargo, cuando la correa tenía tensión y se iniciaba la simulación de movimiento se producían rozamientos. Estas simulaciones de movimiento se realizaban al aire, es decir, sin que la superficie de la oruga realizara contacto. Por otro lado se vio que la goma flexaba excesivamente al apoyarse el peso sobre una esquina, esto dificultaría enormemente la marcha al producir un movimiento de “sube-baja” en los escalones.

- **Ensayos sobre tramos escalonados de baja inclinación ($\alpha \approx 20^\circ$)**

El primer problema que se vio es que efectivamente la goma flexaba demasiado. Esto se producía por dos factores:

Por un lado la goma utilizada era demasiado flexible, como ya se notó en el banco de trabajo.

Por otro, tanto la distancia entre ejes de la oruga como la altura entre los dos niveles de ésta resultó ser excesivo. Al apoyar el peso sobre el escalón la oruga se hundía sobre él, por lo que para pasar al siguiente escalón, había que elevar la oruga lo suficiente para que los dos ejes inferiores superaran las esquinas de los escalones.

A pesar de todo lo anterior el problema principal se produjo porque la correa se desplazaba lateralmente sobre la longitud de los ejes. Sobre el banco de trabajo ya se vio que las diferentes opciones de correa producían en mayor o menor medida tensiones indeseadas, sin embargo, al aplicar peso a la oruga y deslizarla sobre la superficie de los escalones, en lugar de moverla al aire, se vio que los desplazamientos indeseados sobre el eje y los rozamientos se multiplicaban, hasta el punto de salirse la correa de los ejes.

Primero se probó con varios bujes de bicicleta, su geometría permitía que la correa no se saliera por los extremos, sin embargo se producían grandes rozamientos entre el canto de ésta y los bordes del buje. En segundo lugar se probó con ruedas de monopatines que al igual que los bujes incorporaban unos buenos rodamientos, sin embargo la correa seguía desplazándose hacia los lados y saliéndose de las ruedas, además, al aplicar una gran tensión, los rodamientos de la rueda se descentraban al deformarse el plástico de ésta. A continuación se probó con ruedas de patinetes buscando que su geometría se adaptara a la forma combada que adoptaba la cubierta de bicicleta al aplicar tensión, los resultados fueron igual de desalentadores. Por último se probó con ruedas de monopatín mecanizadas para adoptar la forma de una polea, pero ocurría igual que con los bujes de bicicleta, se producían grandes rozamientos.

- **Ensayos sobre tramos escalonados de alta inclinación ($\alpha \approx 40^\circ$)**

Además de los problemas de rozamiento y desplazamiento en la correa tenidos también en las anteriores escaleras, surgió un nuevo y grave problema. Con esta inclinación mayor resultaba imposible mantener el asiento inclinado hacia atrás para poder maniobrar con las manos, el asiento tendía a inclinarse hacia el frente constantemente y proyectar al usuario hacia abajo. Durante las pruebas se echó en falta un respaldo con el que poder empujar hacia atrás la silla.

6.1.3 Conclusiones sobre la primera construcción

- Sobre la oruga
 - El uso de una cubierta de bicicleta como correa resultó poco eficiente, se habría de adquirir otro tipo de correa.
 - La altura de la oruga resultó ser excesiva y requerir un esfuerzo enorme para superar los escalones.
 - Sería imprescindible la incorporación de un sistema de tensado en uno de los ejes extremos, especialmente para garantizar el paralelo entre ejes y solucionar el problema de desplazamiento hacia los lados de la correa, eliminando así los rozamientos que dificultaban el giro de la oruga.
 - Se habrían de construir idénticas piezas de articulación silla-oruga pero de un espesor mucho mayor para lograr una unión más estable y resistente.

- Sobre el chasis
 - Después de las pruebas con el prototipo se tomó conciencia de que el centro de gravedad del usuario se situaba excesivamente adelantado, esto habría que solucionarlo, probablemente desplazando el punto de articulación oruga- silla.
 - Se habría de construir uno nuevo más sólido y que además permitiera una mejor sujeción del respaldo.

6.2 Modificaciones al diseño

Tras los problemas encontrados durante la fabricación y los ensayos con el primer prototipo se decidieron varias modificaciones sobre el diseño original. Como con la primera construcción surgieron muchos problemas, tanto en las modificaciones al diseño como en la segunda construcción se siguió omitiendo la guía para las ruedas y las ruedas, tanto las principales como las secundarias.

6.2.1 Modificaciones sobre el respaldo

Se necesitaba un respaldo que permitiera el movimiento libre de los brazos para poder “caminar” con ellos y que, además, permitiera hacer presión con la espalda hacia atrás, y de este modo hacer palanca para mantener la silla inclinada hacía atrás de forma segura durante el desplazamiento por los tramos escalonados. Para cubrir esta necesidad y descartando nuevamente la realización de un complicado asiento plegable, se optó por realizar un respaldo estrecho y considerablemente alto. Al ser bastante alto permitiría inclinar la silla hacia atrás con el menor esfuerzo.

Todos los planos de las piezas se adjuntan en formato electrónico.

- **Relación de piezas del respaldo**
 1. Barra tubular x2 [Plano 25]
 2. Chapa rectangular x2 [Plano 26]

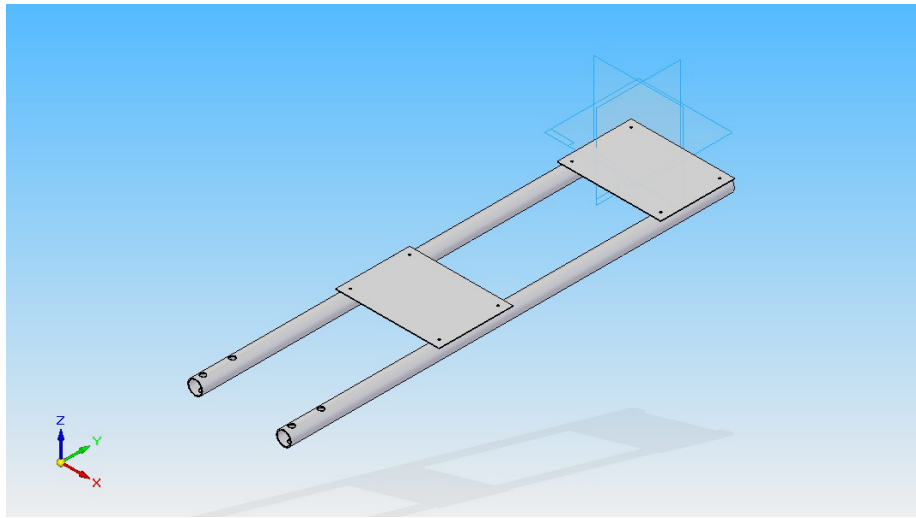


Ilustración 61 Respaldo

6.2.2 Modificaciones sobre la oruga

Tras las pruebas con la primera construcción y el fracaso intentando desplazarse con la oruga se vio que era mucho más efectivo, aunque aumentara un poco el peso, añadir más ejes a la oruga y eliminar el diseño a dos alturas tan poco eficiente y que requería tanto esfuerzo para pasar de un escalón al siguiente.

- **Relación de piezas de la oruga**
 1. Buje bicicleta x2 [Plano 1]
 2. Rueda monopatín x4 [Plano 27]
 3. Correa x1
 4. Chasis:
 - a. Vástago 120 Ø4 x2[Plano 7]
 - b. Vástago 120 Ø8 x4 [Plano 8]
 - c. Tuerca Ø4 x4 [Plano 10]
 - d. Tuerca Ø8 x8 [Plano 11]
 - e. Arandela Ø4 x4 [Plano 12]
 - f. Arandela Ø8 x8 [Plano 13]

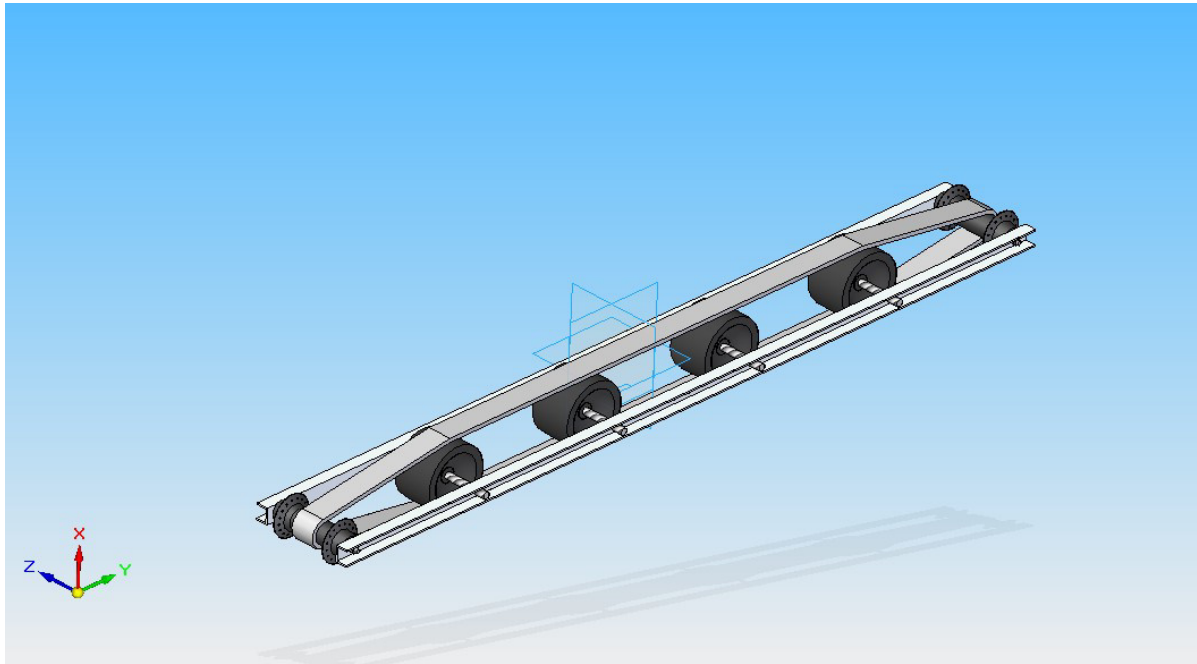


Ilustración 62 Oruga segunda construcción

6.2.3 Modificaciones sobre el asiento

Después de las primeras pruebas quedó patente que resultaba demasiado difícil mantener el asiento inclinado hacia atrás al subir o bajar escalones, por ello, se decidió adelantar el eje en torno al que se articulaba la oruga desde la parte posterior del asiento hacia el frente de la silla. Se decidió adelantar este eje 15 centímetros, para que el trasero del usuario quedara completamente por detrás de la barra de articulación, y así asegurar que el centro de gravedad quedara hacia la parte posterior.

Además, para solucionar las dificultades que se tuvieron durante la construcción y evitar imperfecciones, se diseñó un chasis para el asiento mucho más sencillo y en perfiles de aluminio cuadrados de 20x20 mm. Con estos perfiles la tarea de taladrar resultaría mucho más sencilla y con el nuevo diseño se eliminaba la necesidad de chapas de unión en las esquinas, ya que se unían las barras directamente unas encima de otras. Los brazos de los reposapiés se construyeron igualmente con perfiles cuadrados y se unieron al resto del asiento mediante dos piezas de unión rectangulares. Asimismo en la parte posterior se pusieron dos barras una encima de la otra para hacer la unión del respaldo más sólida.

- **Relación de piezas del asiento**

1. Barra perfil cuadrado 500 x7 [Plano 28]
2. Barra tubular 500 x1 [Plano 29]
3. Escuadra madera x2 [Plano 30]
4. Reposapiés madera x2 [Plano 31]
5. Ariculación madera x2 [Plano 32]
6. Tornillo 50 Ø8 x8 [Plano 33]
7. Tornillo 60 Ø8 x8 [Plano 34]
8. Tornillo 70 Ø8 x8 [Plano 35]
9. Tuerca Ø8 x24 [Plano 11]
10. Arandela Ø8 x24 [Plano 13]

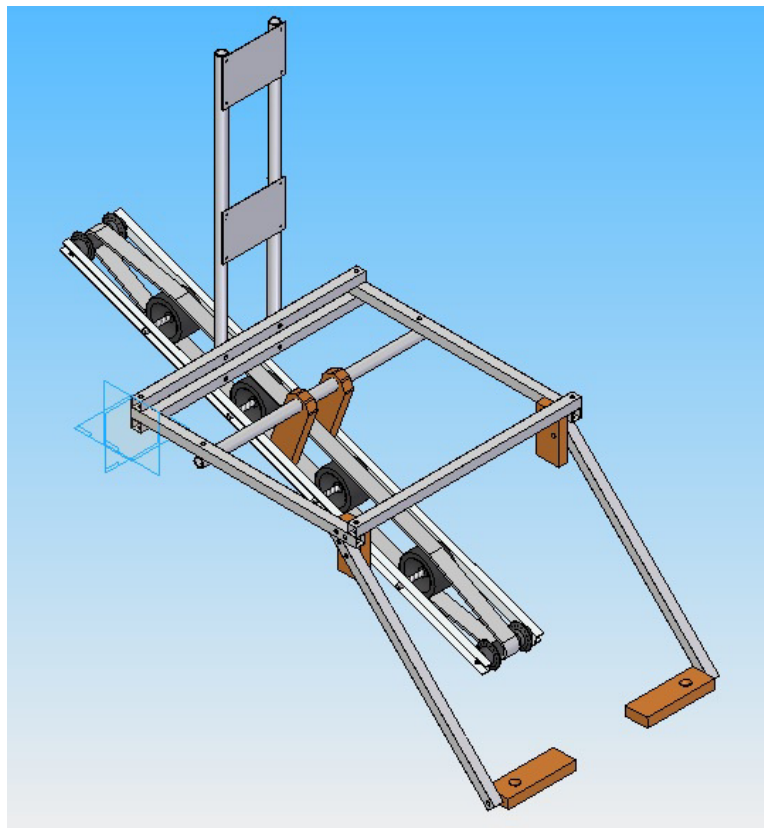


Ilustración 63 Diseño modificado

6.3 Segunda construcción

6.3.1 Proceso de construcción

- Construcción del chasis

Se siguieron las mismas directrices que en la primera construcción, mínimo presupuesto posible, herramientas y materiales fácilmente asequibles, etc. Pero esta vez se contaba con las ventajas de los cambios y simplificaciones realizados en el diseño. La unión de todas las barras del chasis resultó mucho más fácil de realizar. Por otro lado, tanto las nuevas piezas de articulación que se necesitaba fueran más anchas, las escuadras para unir los brazos del reposapiés al asiento y los mismos reposapiés se realizaron en madera, un material mucho más fácil de trabajar que el aluminio. Además, realizar estas piezas en madera hizo la silla más ligera que si las hubiéramos realizado en aluminio.

En la siguiente imagen se puede ver como la articulación se ha desplazado 15 cm hacia el frente y como se ha construido el nuevo asiento de perfiles cuadrados mucho más sólidos, con doble barra en la parte posterior:

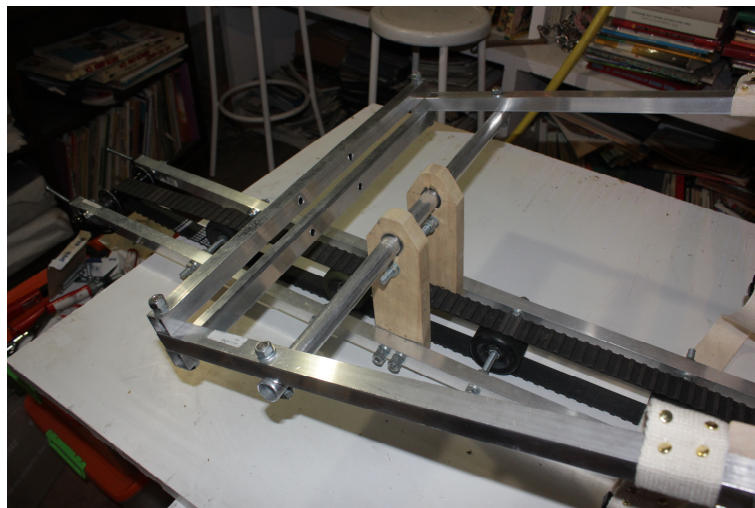


Ilustración 64 Vista del chasis

En la siguiente imagen se puede ver una de las escuadras fabricadas en madera:

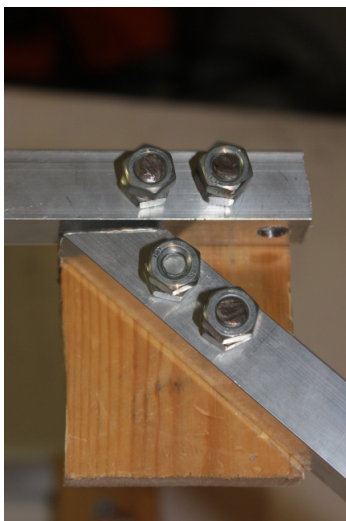


Ilustración 65 Vista de una escuadra

A continuación una imagen de los ligeros reposapiés en madera:



Ilustración 66 Reposapiés

Para el segundo prototipo también se añadió la lona del asiento fabricada con una pieza de cuero reciclada y se añadió un cinturón de seguridad:

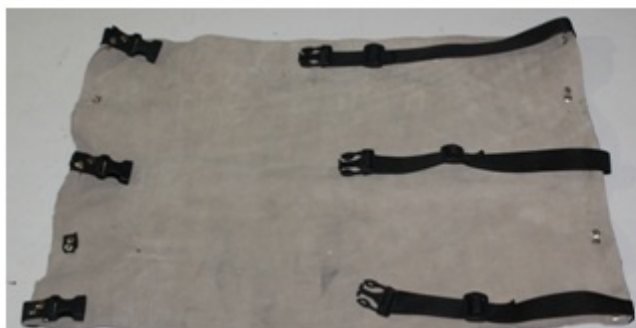


Ilustración 67 Lona asiento y cinturón

- **Construcción de la oruga**

En la construcción de la oruga, al igual que había pasado la primera vez, se probaron algunos materiales diferentes, diferentes elementos como ejes, etc. Sin embargo, gracias a la compra de una correa de transmisión industrial a bajo costo en una fábrica de correas, se llegó a una solución mucho más eficiente y con menos rozamientos que la primera opción rápidamente. La construcción final se realizó con 2 bujes de bicicleta en los extremos, 4 ruedas de monopatín en los ejes intermedios y una correa de transmisión industrial de 4 cm de ancho y dos milímetros de espesor, con perfil dentado.

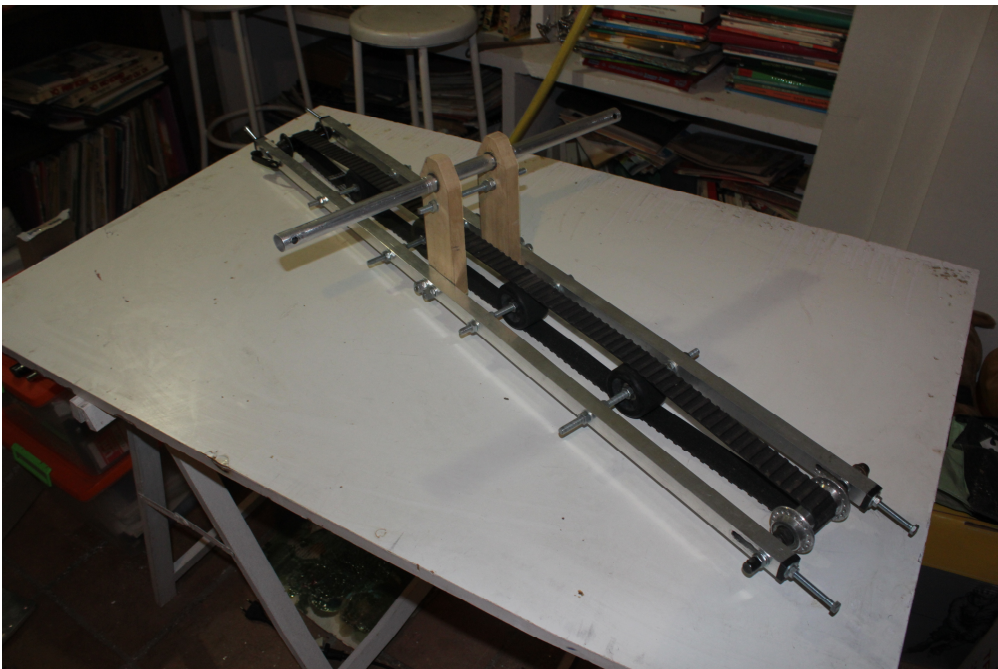


Ilustración 68 Vista oruga segundo prototipo

Además de la importante diferencia de estar construida a una sola altura, esta vez se otorgó a la oruga de un sistema de tensado en ambos extremos, basado en el sistema de tensión de cadena de las motocicletas.

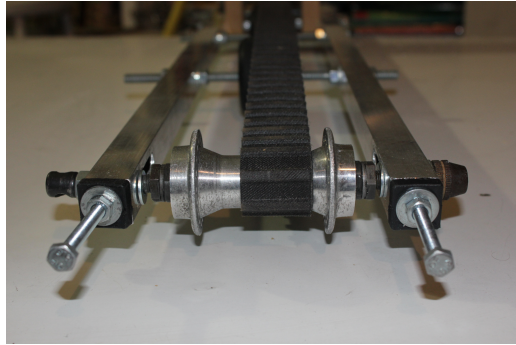


Ilustración 69 Vista frontal oruga

- **Construcción del respaldo**

La realización del respaldo fue bastante sencilla, se utilizaron dos tubos de 20mm de diámetro reciclados de la primera construcción. Esta vez no se cumplió con la prescripción de realizar todas las piezas desmontables ya que se usaron remaches en lugar de tornillos como medida de seguridad, para evitar que el usuario se clavara éstos en la espalda.

En la siguiente foto se puede ver el respaldo construido así como el cinturón que se montó. Este cinturón, al igual que los montados en el asiento, cumpliría con dos funciones. Por un lado otorgar seguridad, y por el otro, facilitar la maniobrabilidad, ya que el usuario podría tanto empujar como tirar del respaldo para variar la inclinación del asiento.

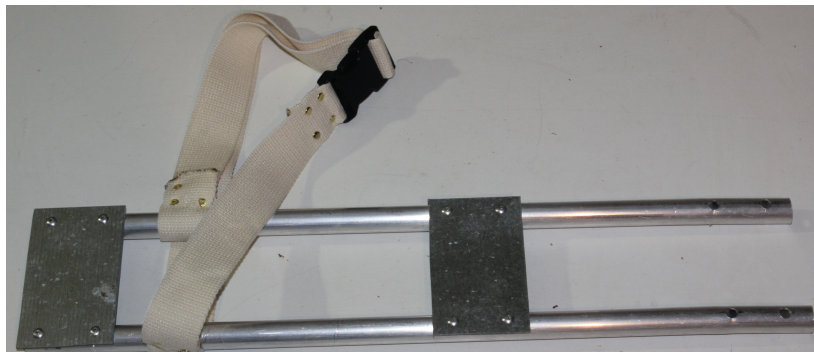


Ilustración 70 Respaldo

6.3.2 Ensayos sobre la segunda construcción

Ensayos sobre banco de trabajo

Las primeras pruebas que se hicieron en el banco de trabajo fueron sobre el sistema de tensado. Tras unas cuantas operaciones de tensado fallidas, en las que se buscaba tanto tensar la correa como el paralelismo perfecto entre ejes, se descubrió que había sido un error fabricar dos tensores en cada extremo. Esto se debe a que al regular 2 tensores en cada extremo, 4 tensores en total, se producen desplazamientos en la dirección longitudinal de la oruga de una de las barras respecto de la otra. En la imagen se explica este desplazamiento relativo.

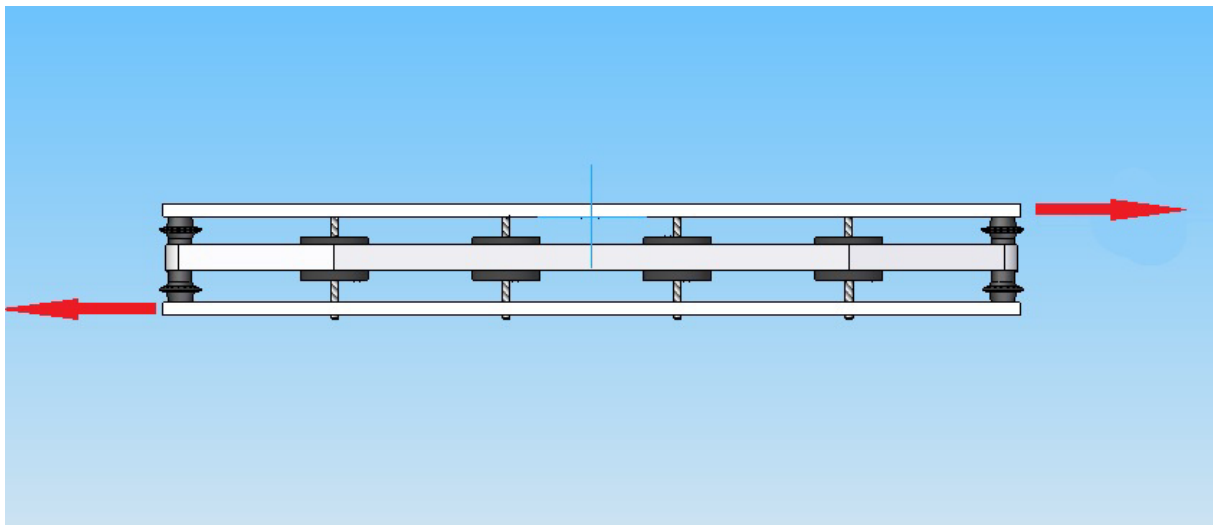


Ilustración 71 Desplazamiento relativo entre partes del chasis

La solución se halló dejando en una posición fija los 2 tensores de uno de los extremos y ajustando únicamente uno de los dos lados. Gracias a estos sistemas de tensado se logró que la correa no se desplazara hacia los lados de los ejes, logrando reducir enormemente los rozamientos. Sin embargo, debido principalmente a los rodamientos de las piezas utilizadas y a la gran tensión de trabajo no se logró un movimiento óptimo y tan libre de rozamientos como se hubiera deseado.

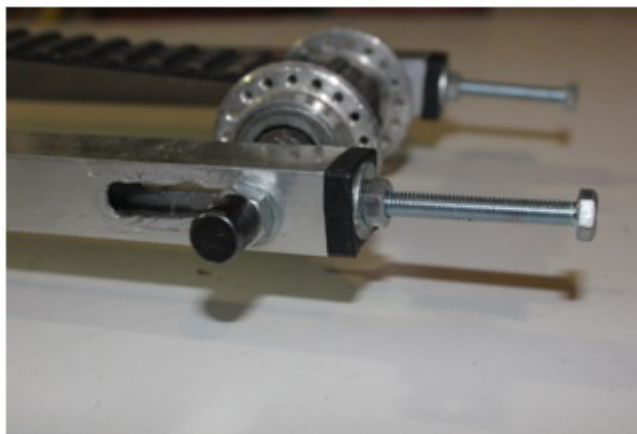


Ilustración 72 Detalle sistema de tensado

En el mismo banco de trabajo se vio que la correa adquirida era muy poco elástica, por lo cual flexaba mucho menos en el vano entre eje y eje. Además, un factor importante es que la correa trabajaba muy bien al hacer girar la oruga en el aire, las gomas de bicicleta, al ser elásticas, producían más rozamientos ya que al pasar por los ejes extremos se producían estiramientos y contracciones.

Ensayos sobre tramos escalonados de baja inclinación ($\alpha \approx 20^\circ$).

La primera conclusión fue que seguía siendo demasiado difícil subir tramos escalonados, sin embargo la oruga dio muy buenos resultados para realizar el descenso. Como ya se había notado en las pruebas en el banco de trabajo, la correa permaneció firme al probarla sobre los escalones, sin doblarse prácticamente.



Ilustración 73 Vista contacto con el escalón

Al estar fabricada en una sola altura el descenso se desarrollaba de una manera fluida y cómoda, controlando la velocidad con los propios brazos. Estas características se vieron incrementadas porque en los cuatro ejes intermedios el apoyo se realizaba estrictamente entre correa y escalón, no como en los ejes extremos, en los que los ejes (los bujes de bicicleta) chocan con la superficie de los escalones.



Ilustración 74 Contacto correa escalón

En segundo lugar, y tras realizar unos cuantos descensos se notó que la silla era considerablemente más estable y sólida, al haber realizado las dos piezas de articulación mucho más anchas que las anteriores y estar todas las piezas del asiento más firmemente unidas. En la siguiente imagen se pueden ver las piezas de articulación y las pequeñas anillas que las inmovilizan en la barra del asiento.



Ilustración 75 Articulación en madera

Ensayos sobre tramos escalonados de alta inclinación ($\alpha \approx 40^\circ$).

Al realizar las pruebas en las escaleras de alta inclinación apareció un nuevo e importante inconveniente. Al estar las escaleras muy inclinadas la silla se aceleraba demasiado, resultando muy difícil controlar la velocidad de bajada con la propia fuerza de los brazos. Este inconveniente no surgió con la primera silla porque la oruga que montaba tenía mucho rozamiento y las dos alturas ponían muchas trabas a la aceleración de ésta.

Por el otro lado, sin embargo, se notó que las medidas tomadas para controlar la inclinación de la silla funcionaban a la perfección. Al haber adelantado la barra de la articulación, el centro de gravedad caía por detrás, así en las pruebas en las escaleras no se tubo ninguna dificultad para inclinarse hacia atrás y de este modo poderse impulsar. El respaldo y los cinturones también trabajaron perfectamente sin correr riesgo en ningún momento de caer hacia el frente.

6.3.3 Conclusiones sobre el segundo prototipo

- Con la silla construida no se ha sido capaz de subir tramos escalonados y ha resultado imposible también bajar tramos escalonados con mucha pendiente, por ello habría que tomar tres medidas:
 - La primera será realizar una oruga que gire de manera mucho más eficiente, con mucho menos rozamiento, para poder ascender sin tanta dificultad.
 - La segunda medida, idea surgida a raíz de estas pruebas, será dotar a la oruga de un sistema de carraca. Este sistema permitirá en el ascenso descansar cuantas veces sea necesario, ya que la oruga sólo podrá girar en un sentido y se bloqueará cuando retiremos las manos de los escalones.
 - La tercera medida será montar un sistema de frenado, también en la oruga, para poder regular la velocidad en el descenso sin necesidad de recurrir íntegramente a la fuerza de los brazos.
- Los resultados obtenidos con la correa de transmisión fueron ampliamente mejores que los conseguidos con la cubierta de rueda de bicicleta. Dependiendo del presupuesto que se tenga a la hora de fabricar la silla podría ser una solución viable. La correa utilizada era un sobrante de la fábrica así que sólo costó 20 euros, pero su precio suele ser bastante superior.

- Las medidas tomadas respecto al primer diseño consistente en fabricar un estrecho y alto respaldo y desplazar el punto de articulación hacia el frente han arrojado excelentes resultados, por lo cual serán modificaciones definitivas y a tomar en cuenta en próximos prototipos.
- La utilización de madera, en cuanto a una fabricación propia y con los menores recursos, ha resultado también muy ventajosa. La madera es un material mucho más barato que el aluminio y mucho más fácil de trabajar. También es cierto que en condiciones adversas, como en condiciones de humedad, la madera puede resultar inapropiada por su menor durabilidad.

6.4 Estudio de cargas

Una vez realizado el diseño y los ensayos se hizo un análisis de cargas de las dos piezas que más sufrían durante el uso de la silla: el respaldo y la oruga. Este análisis se realizó con vistas de comprobar la seguridad de la estructura de la silla y verificar que los materiales y dimensiones elegidos serían suficientes para un uso seguro de la misma.

6.4.1 Introducción teórica:

A continuación se ha realizado una pequeña introducción sobre las nociones básicas de resistencia de materiales en materiales elásticos e isótropos.

- **El módulo de Young o módulo de elasticidad longitudinal:**

Para los materiales elásticos lineales la gráfica tensión-deformación sería:

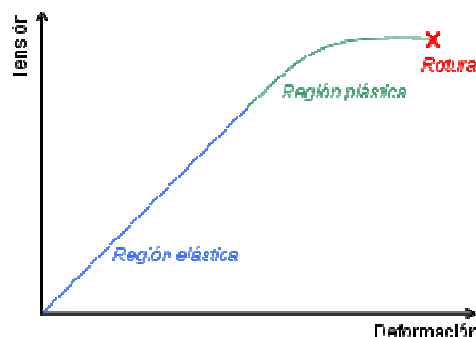


Ilustración 76 Gráfica tensión-deformación

La región elástica representa la zona en la cual si se elimina la tensión, la deformación producida se recupera en su totalidad, volviendo el material a sus dimensiones originales.

Para la región de deformación elástica se define la constante E (módulo de Young) como la relación entre la tensión del material y la deformación.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \text{ donde } \sigma \text{ representa la tensión y } \varepsilon \text{ la deformación}$$

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad \text{y} \quad \varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

- **El coeficiente de Poisson en materiales isótropos:**

Se define el coeficiente de Poisson como la razón entre el alargamiento producido en una dirección y el acortamiento producido como consecuencia en dirección perpendicular. Esta razón se puede expresar como razón de las deformaciones.

$$\nu = \frac{\varepsilon_{transversal}}{\varepsilon_{longitudinal}}$$

Aplicando esta ecuación a las 3 dimensiones se concluye que una deformación en una dirección producirá deformaciones en las otras dos direcciones, de ahí se deduce la Ley de Hooke Generalizada:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)]$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]$$

6.4.2 Programa y parámetros del programa utilizados:

El programa utilizado para el cálculo de cargas sobre las piezas elegidas fue Ansys. Este programa, mediante la introducción de las cargas aplicadas, las dimensiones de la pieza y las propiedades elásticas del material, calcula las tensiones y deformaciones producidas en cada punto de la pieza mediante la aplicación de las fórmulas teóricas y un sistema de mallado e interpolación.

Las propiedades sobre la pieza introducidas en el programa fueron idénticas tanto para la oruga como para el respaldo, ya que todos los componentes analizados eran de aluminio de 1 mm de espesor.

- **Material:**

Aluminio:

Módulo de Young, $E = 7,2 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$

Coefficiente de Poisson: $\nu = 0,33$

- **Preproceso**

Antes de realizar el diseño geométrico hay que introducir algunas variables.

Para el diseño se eligió trabajar con un modelo de chapa, ya que las piezas utilizadas tenían todas una dimensión mucho menor que las demás, el espesor.

Todas las piezas tienen un espesor $e=1 \text{ mm}$.

Para la resolución del cálculo el programa realiza un mallado de las piezas en nodos, y calcula los valores de tensión y deformación en todos los que constituyen la pieza.

El mallado para la simulación de esfuerzos se hizo de un tamaño de 0,6 mm.

6.4.3 Pautas de las simulaciones:

- **Posiciones de la silla**

Los ensayos se realizaron en las dos posiciones extremas de la silla; con el asiento de la silla horizontal y con la silla en su punto de máxima inclinación hacia atrás.

Según el Código Técnico de Edificación en España, como se vio en apartados anteriores, la huella mínima ha de ser de 28 cm y la contrahuella máxima no puede sobrepasar los 18,5 cm. Por lo tanto:

Si $\tan \alpha = 18,5/28 = 0.661$; Luego el ángulo de máxima inclinación de las escaleras será $\alpha = 33.5^\circ$.

Según el Código Técnico de Edificación la inclinación máxima no debería sobrepasar los $33,5^\circ$, sin embargo, para tener margen de seguridad y por la experiencia tenida con las escaleras en las que se realizaron los ensayos, se supondrá que la inclinación máxima de las escaleras podría llegar a los 45° .

La inclinación máxima que podría tener la silla sería la situación en la que el respaldo del asiento quedara paralelo a la oruga, esto significaría una inclinación de 45° de la base del asiento con respecto al plano horizontal.

- **Peso del usuario**

Las simulaciones se realizaron con un usuario de masa $m=100$ Kg.

Siendo la fuerza de la gravedad $g=9,81 \text{ m/s}^2$ el peso del usuario será:

P=981 N

6.4.4 Análisis de cargas en la oruga

- Dimensiones de la oruga

Las principales dimensiones de la oruga quedan relatadas a continuación en los esquemas de alzado y frente.

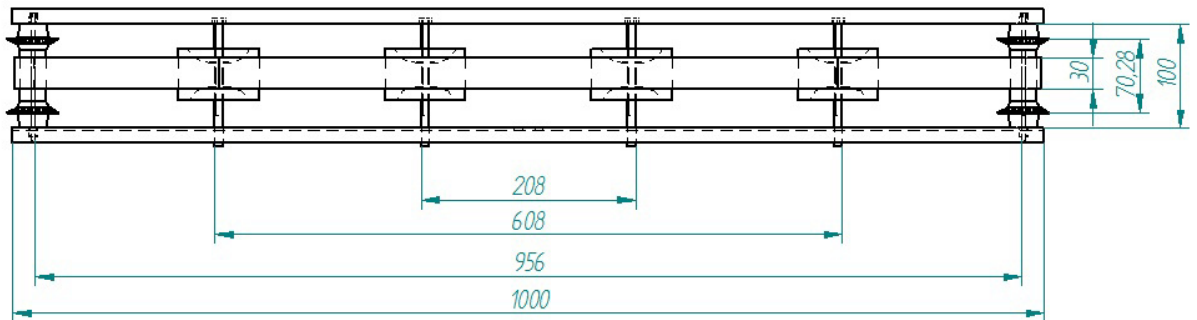


Ilustración 77 Vista de alzado oruga

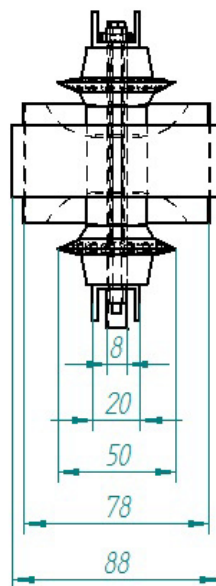


Ilustración 78 Vista frontal oruga

- **Esfuerzos**

- Silla en posición horizontal

Todo el peso del usuario recae sobre el eje en el que se articula la oruga a la silla, la pieza de articulación transmite la fuerza vertical directamente a los tornillos que la unen a la oruga y éstos al chasis de la oruga. Tenemos entonces una fuerza vertical $P=981\text{ N}$ repartida entre las dos piezas de articulación.

Luego $P_1 = P_2 = 490.5\text{ N}$

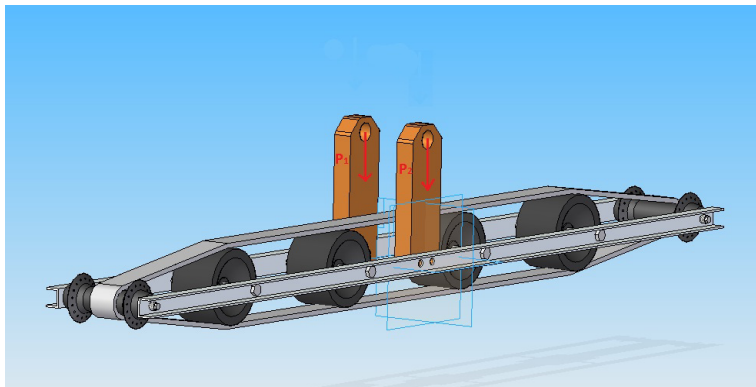


Ilustración 79 Fuerzas verticales sobre la oruga

- Silla inclinada 45 grados hacia atrás

Nuevamente el punto de aplicación de la carga es el eje de las piezas de articulación, pero esta vez las fuerzas están inclinadas 45 grados, lo que provocará momentos sobre las uniones entre pieza de articulación y oruga.

Igualmente $P_1 = P_2 = 490.5\text{ N}$

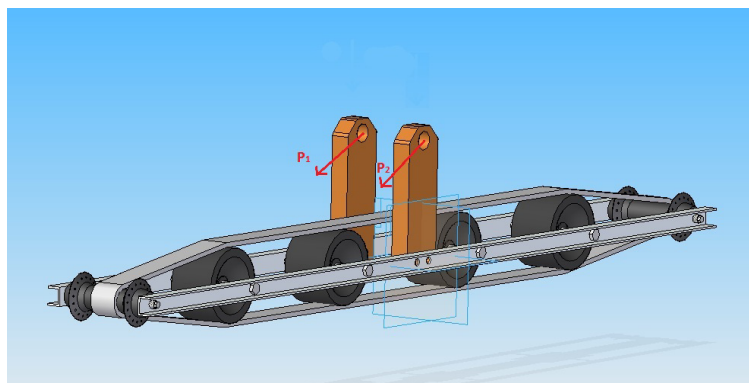


Ilustración 80 Fuerzas a 45 grados sobre la oruga

- **Diseño en Ansys**

Para el cálculo de los esfuerzos se ha aplicado la carga en el perímetro de los agujeros de las chapas de articulación en los que se apoyaría la barra del asiento, y las restricciones de movimiento en el perímetro de los agujeros en los que irían los ejes de la oruga.

En la siguiente imagen se puede ver el diseño de la oruga con las piezas de articulación en el programa Ansys.

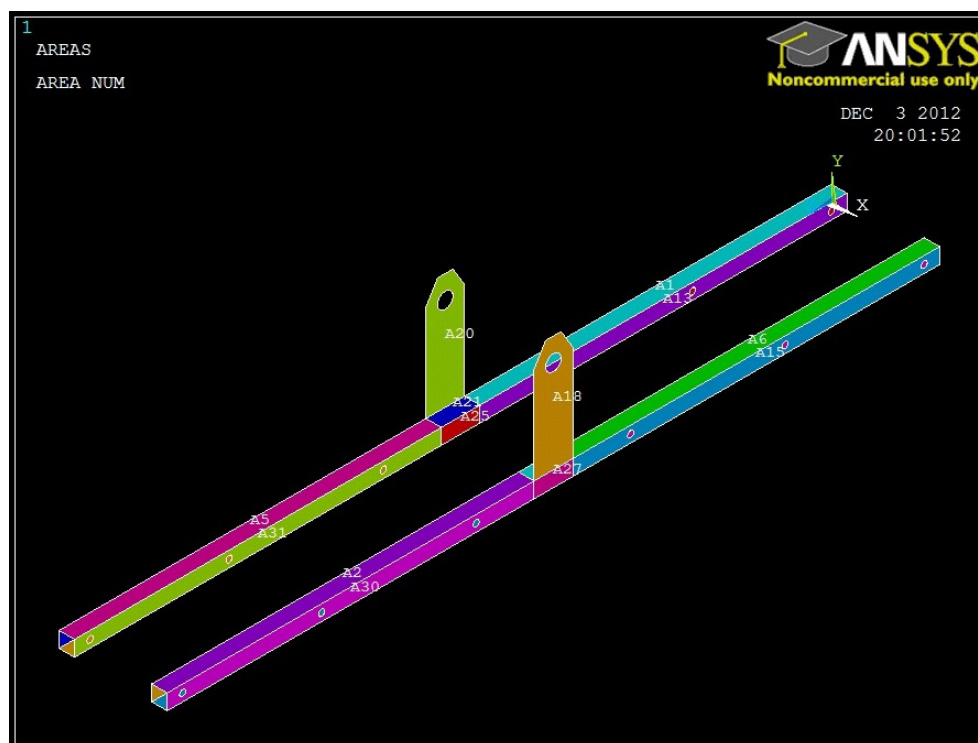


Ilustración 81 Oruga en el programa Ansys

En la siguiente imagen se muestra la oruga una vez realizado el mallado de 0.6 mm.

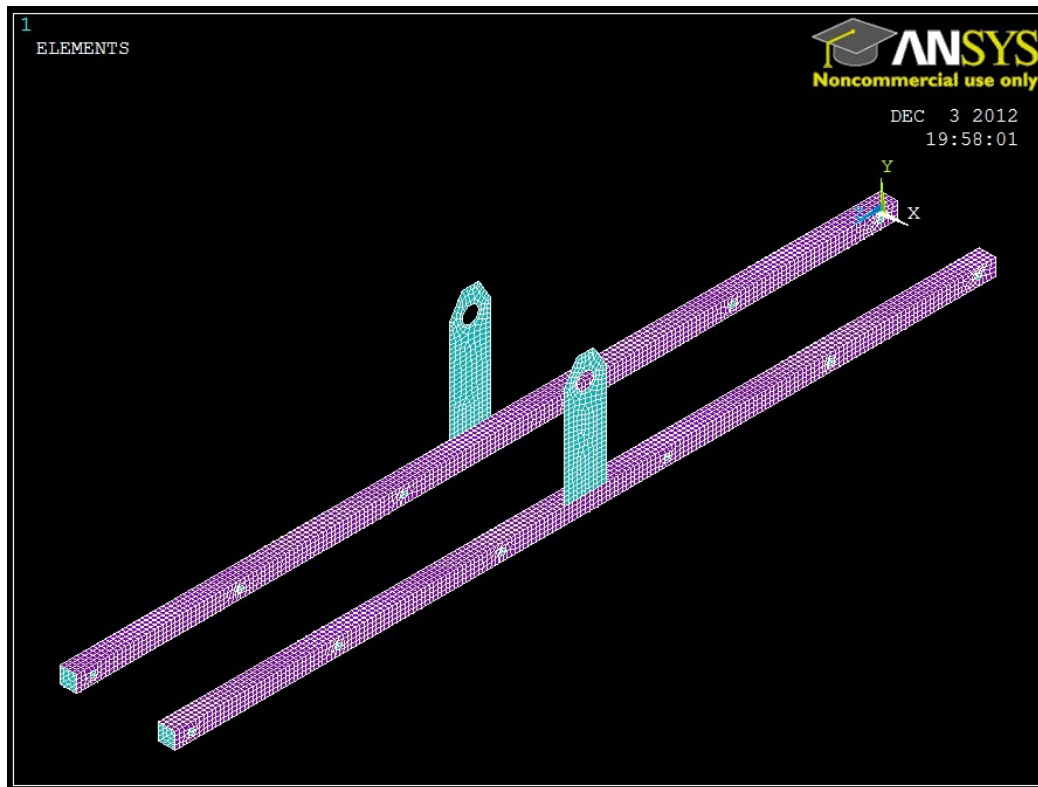


Ilustración 82 Mallado de la oruga en Ansys

- **Resultados de la ejecución del programa**

Nota: Aunque en las imágenes extraídas del programa que se verán a continuación las deformaciones parecen de grandes proporciones, hay que tener en cuenta que el programa aumenta de manera importante las deformaciones reales para que se pueda apreciar a simple vista la tendencia de éstas.

- Deformaciones

1. Silla en posición horizontal

En la siguiente imagen podemos ver las deformaciones sobre el chasis de la oruga y las piezas de articulación cuando la silla se encuentra en posición horizontal y aguanta un peso de 100 Kg.



Ilustración 83 Deformaciones chasis oruga en posición horizontal

De esta imagen se pueden extraer algunas conclusiones. Al estar las chapas unidas a los lados de las barras del chasis en vez de en su parte superior y al medio, las chapas tienden a abrirse. Sin embargo se puede apreciar en la imagen que estas chapas no se han deformado. Por el contrario las barras del chasis si que han sufrido deformación, localizada prácticamente en su totalidad entre los dos ejes intermedios.

La conclusión es que no se ha producido ninguna deformación importante que pueda afectar al diseño, pues las mayores deformaciones en el chasis tienen un desplazamiento absoluto de aproximadamente 0.1 mm (zona verde).

2. Silla inclinada hacia atrás

En la siguiente imagen podemos ver las deformaciones sobre el chasis de la oruga y las piezas de articulación cuando la silla se encuentra inclinada 45 grados y aguanta un peso de 100 Kg.

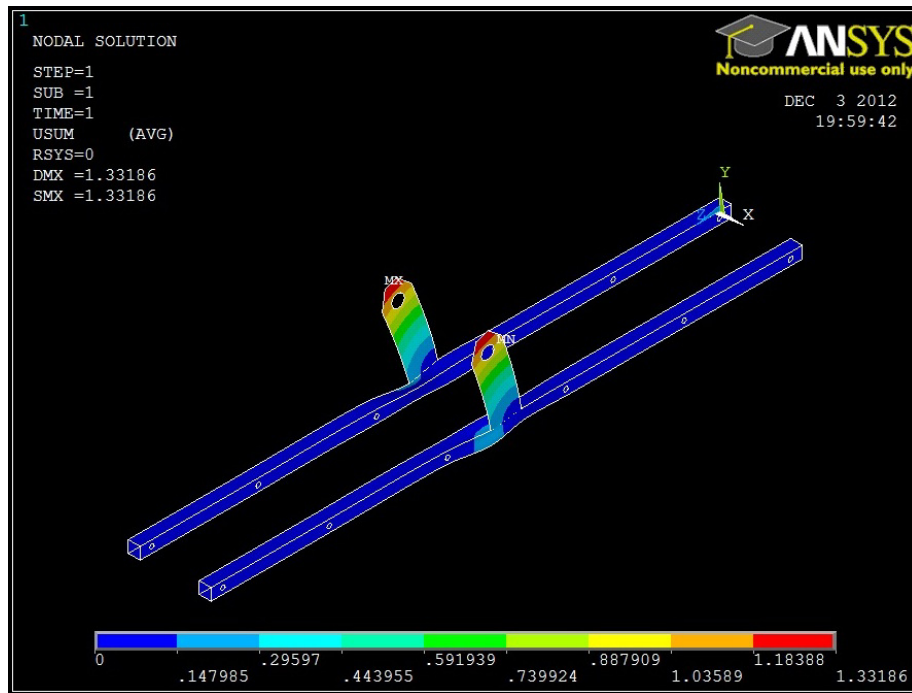


Ilustración 84 Deformación chasis oruga inclinada 45°

En la anterior imagen podemos ver que la tendencia de las deformaciones ha variado considerablemente de la tendencia cuando la silla se encuentra horizontal. Por un lado las chapas de articulación no se han desplazado hacia el exterior, y por otro, debido al momento producido por las chapas, las deformaciones transmitidas al chasis han sido menores.

○ Tensiones

1. Silla en posición horizontal

En la siguiente imagen podemos ver el reparto de tensiones en el chasis de la oruga y en las chapas de articulación cuando la silla se encuentra en posición horizontal.

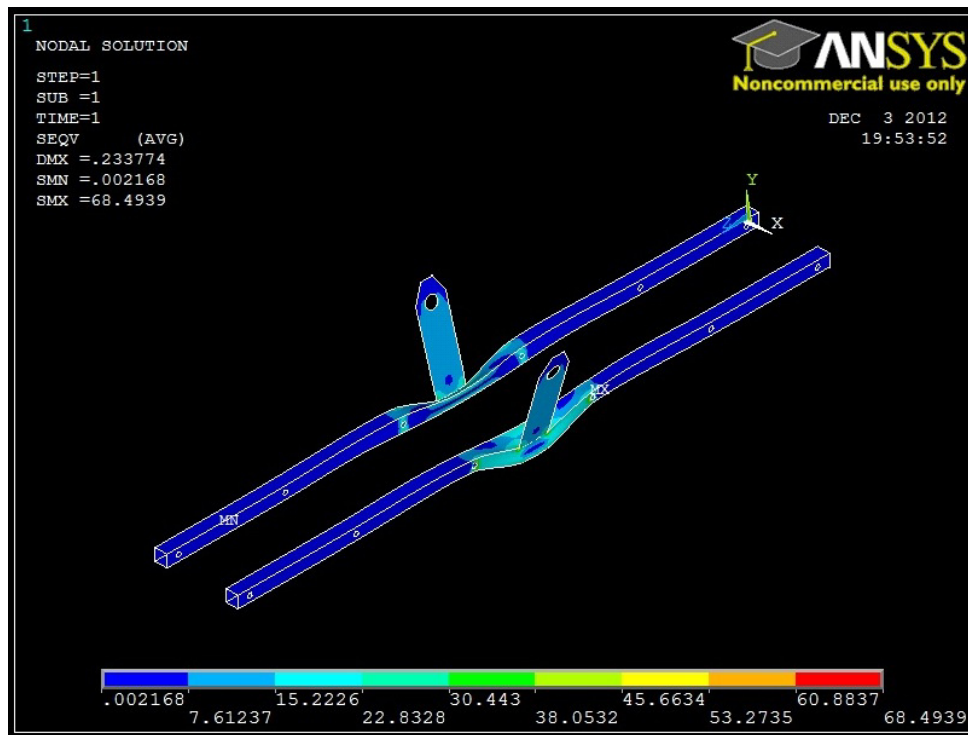


Ilustración 85 Tensiones chasis oruga posición horizontal

De la imagen se extrae una conclusión similar a la extraída en la imagen de las deformaciones, los esfuerzos se concentran entre los dos ejes intermedios.

Los puntos de concentración de tensiones se ven con más detalle en la siguiente imagen.

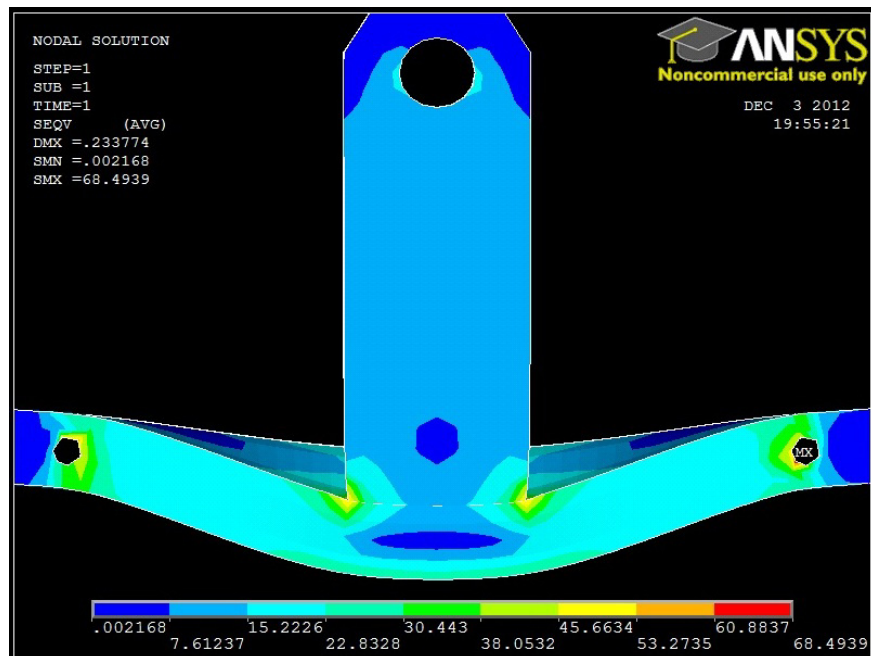


Ilustración 86 Detalle tensiones posición horizontal

En esta imagen se aprecia claramente que las mayores tensiones se concentran en el apoyo de los ejes de la oruga así como en las uniones de la chapa de articulación con la oruga. La mayor tensión se localiza en uno de los ejes de la oruga con un valor:

$$\sigma = 68.49 \frac{N}{cm^2} \times \frac{10^4 cm^2}{m^2} = 0.6849 \times 10^6 \frac{N}{m^2}$$

Luego la tensión máxima sufrida por la pieza será:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 684.9 KPa = 0.685 Mpa$$

Como podemos ver en las imágenes la pieza no rompe, esto se debe a que el límite elástico del aluminio estándar es aproximadamente de 414 Mpa y la tensión máxima de rotura de unos 483 Mpa.

2. Silla inclinada hacia atrás

En la siguiente imagen podemos ver las tensiones producidas sobre la chapa de articulación y el chasis de la oruga cuando la silla se encuentra inclinada y soportando el peso de un usuario de 100 Kg.

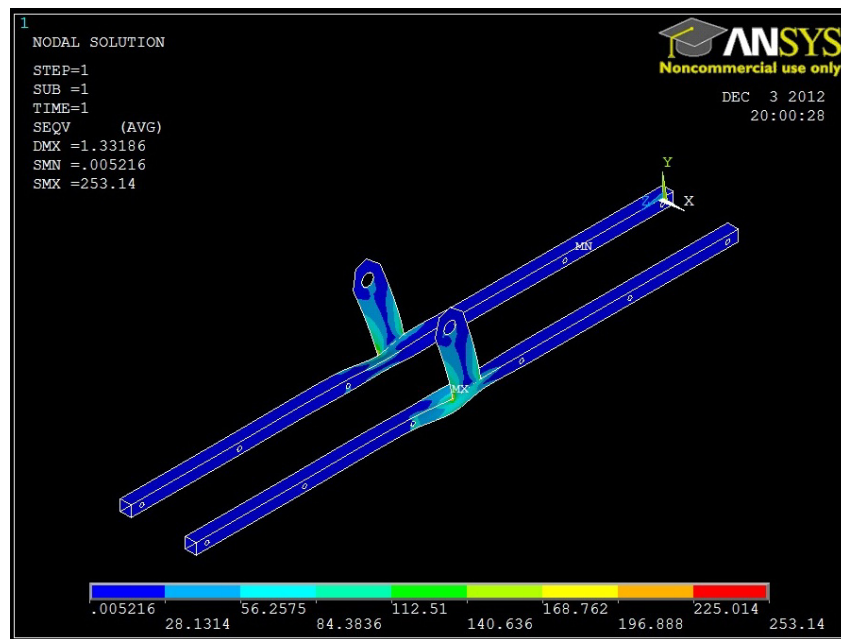


Ilustración 87 Tensiones chasis oruga inclinada 45°

En este caso, podemos ver que las chapas de articulación sufren considerablemente más que en el anterior caso, debido a los momentos y esfuerzos cortantes provocados porque la fuerza recibida por la estructura no está alineada con el punto de unión entre chapa y oruga.

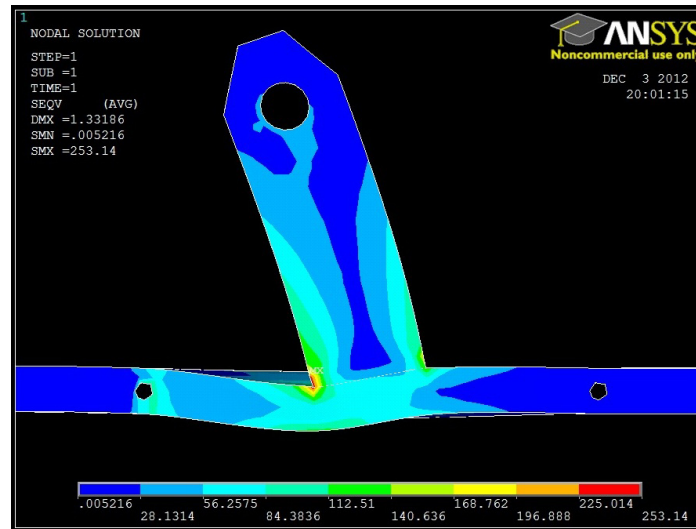


Ilustración 88 Detalle tensiones silla inclinada 45°

Esta vez las mayores tensiones se concentran en los puntos de unión entre chapa y chasis, concretamente en uno de los lados, con un valor máximo de:

$$\sigma = 253.14 \frac{N}{cm^2} \times \frac{10^4 cm^2}{m^2} = 2.53 \times 10^6 \frac{N}{m^2}$$

Luego la tensión máxima sufrida por la pieza será:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 2.53 Mpa$$

Nuevamente podemos ver que las tensiones están en un rango seguro.

6.4.5 Análisis de cargas en el respaldo:

- **Dimensiones del respaldo**

Las dimensiones del respaldo se relatan en el esquema a continuación:

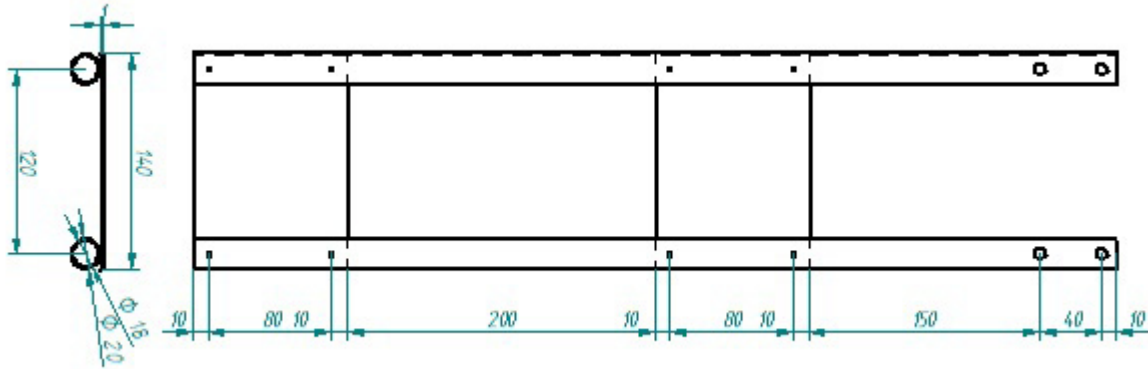


Ilustración 89 Dimensiones respaldo

- **Esfuerzos:**

Para la simulación se impidieron todos los movimientos (empotramiento) de los taladros en los que se introducirían los tornillos para la sujeción al asiento y se supuso la carga uniformemente distribuida sobre las dos planchas en las que apoyaría el peso el usuario.

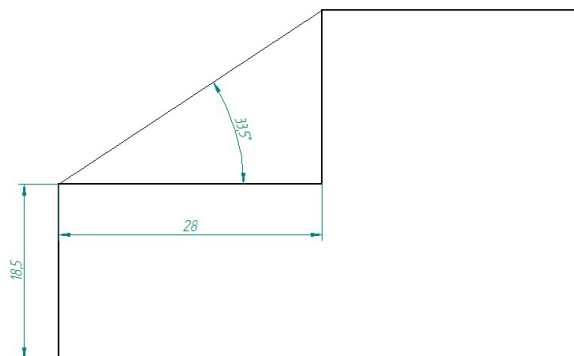


Ilustración 90 Esquema escalones

En la siguiente imagen se representa el peso del cuerpo del usuario como una carga uniformemente distribuida sobre el asiento y el respaldo. Donde P_a representa el peso sobre el asiento y P_r el peso sobre el respaldo.

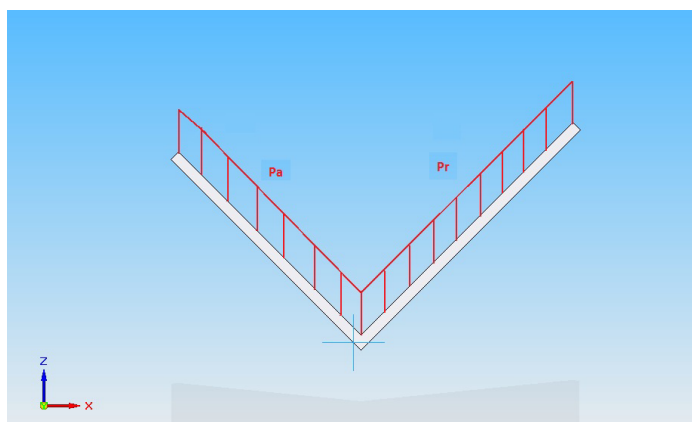


Ilustración 91 Esquema carga distribuida

En nuestro caso nos interesa hacer un estudio sobre el respaldo por lo que sustituiremos el asiento por un empotramiento:

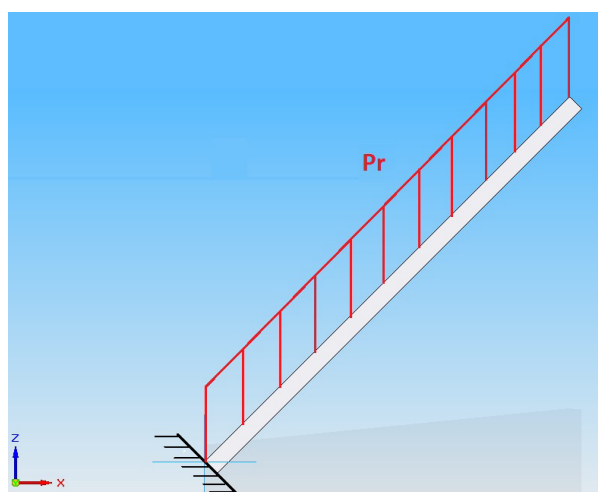


Ilustración 92 Esquema carga distribuida con empotramiento

Este empotramiento representa la unión fija con el asiento.

Según la tabla extraída del estudio *Current perspective on assessment of human body proportions of relevante* [27], podemos suponer que el peso de las piernas de una persona supone en torno al 16% del peso total del cuerpo.

Peso de distintas partes del cuerpo	
Para calcular el IMC es necesario incluir el peso del/de los miembro(s) que falta(n).	
Tabla:	Porcentaje del peso corporal correspondiente a partes específicas del cuerpo
Parte del cuerpo	Porcentaje
Tronco sin miembros	50.0
Mano	0.7
Antebrazo con la mano	2.3
Antebrazo sin la mano	1.6
Parte superior del brazo	2.7
Brazo completo	5.0
Pie	1.5
Parte inferior de la pierna con el pie	5.9
Parte inferior de la pierna sin el pie	4.4
Muslo	10.1
Pierna completa	16.0

Ilustración 93 Porcentajes de peso de las partes del cuerpo, obtenido de [27]

Nota: En el caso de la mano y pierna, se refiere al peso de las dos manos, las dos piernas, etc.

Haciendo la suposición de que con una inclinación de 45 grados el peso de las piernas recae sobre el asiento y el resto sobre el respaldo.

Masa total sobre el respaldo: $M_r = 100 \times 0.84 = 84kg$

Fuerza total vertical sobre el respaldo:

$$F_v = 84 \times 9.81 = 824.04N$$

Descomponiendo en componente tangencial y normal:

$$F_N = F_v \times \cos 45 = 824.04 * \frac{\sqrt{2}}{2} = 582.6N$$

Área de las placas del respaldo:

$$A = 12cm \times 10cm = 120cm^2$$

Al ser dos placas:

$$A_t = 240cm^2$$

Luego en el programa Ansys se habrá de aplicar una carga distribuida (presión) a lo largo de las dos placas de:

$$P = \frac{582.6N}{24000mm^2} = 0.024N/mm^2$$

- **Imágenes del diseño en Ansys**

En la siguiente imagen se muestra el resultado del diseño de la pieza en Ansys, en la imagen se ven las diferentes áreas del modelo de chapa e=1 mm.

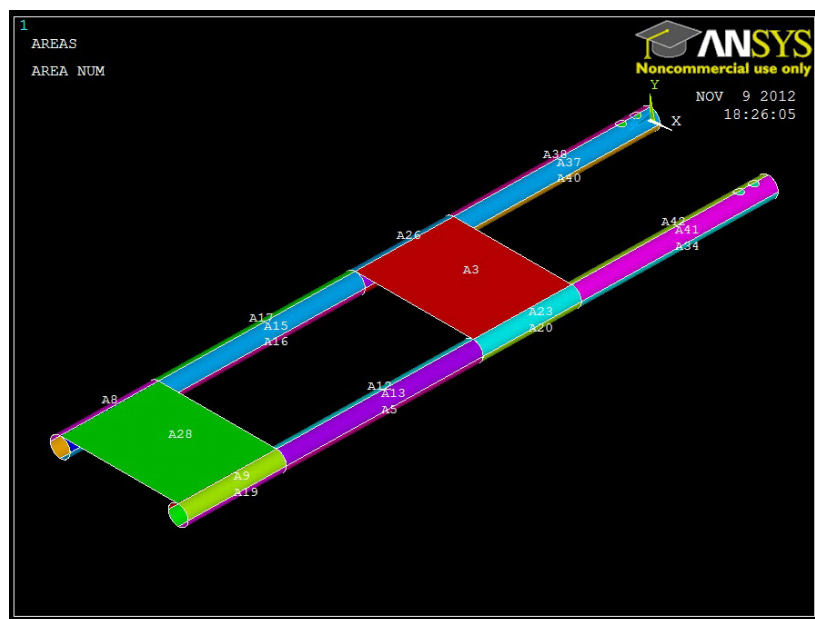


Ilustración 94 Respaldo diseñado en Ansys

En la siguiente imagen se muestra cómo quedó el mallado de tamaño 0,6 mm

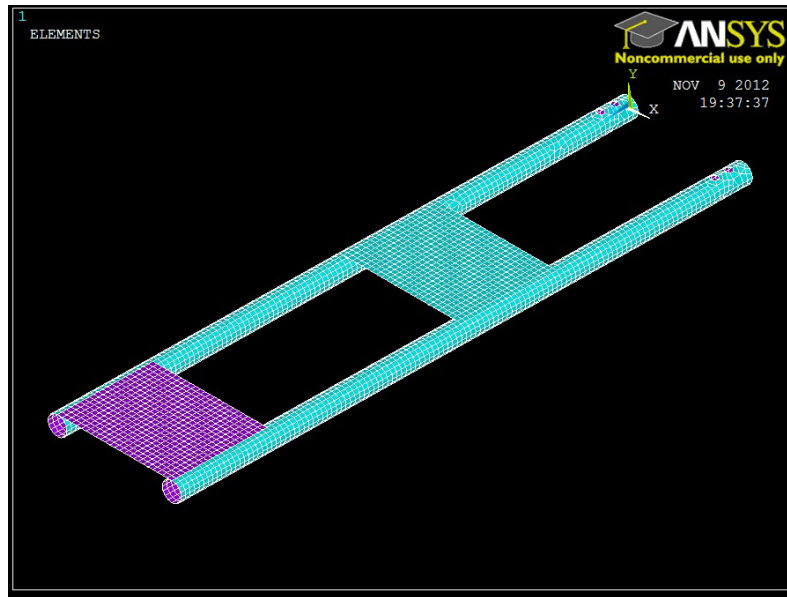


Ilustración 95 Mallado del respaldo

- **Resultados de la ejecución del programa**

- Deformaciones

En las siguientes imágenes se muestran las deformaciones en el respaldo desde diferentes perspectivas:

Vista frontal:

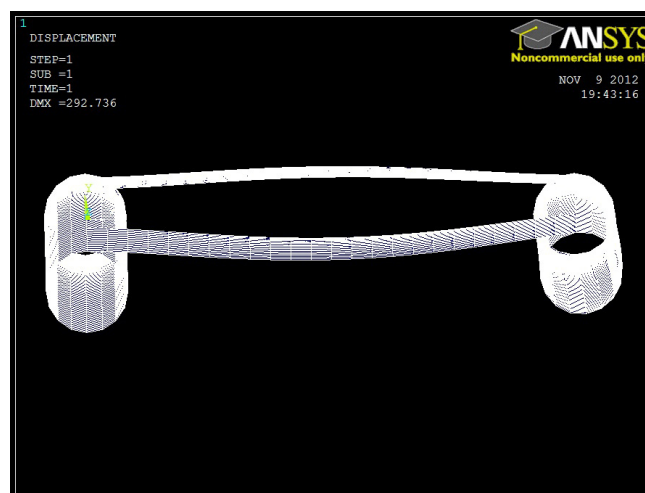


Ilustración 96 Vista frontal deformación

Vista lateral, en la que se aprecia cómo se dobla el respaldo y su desplazamiento respecto a su posición normal.

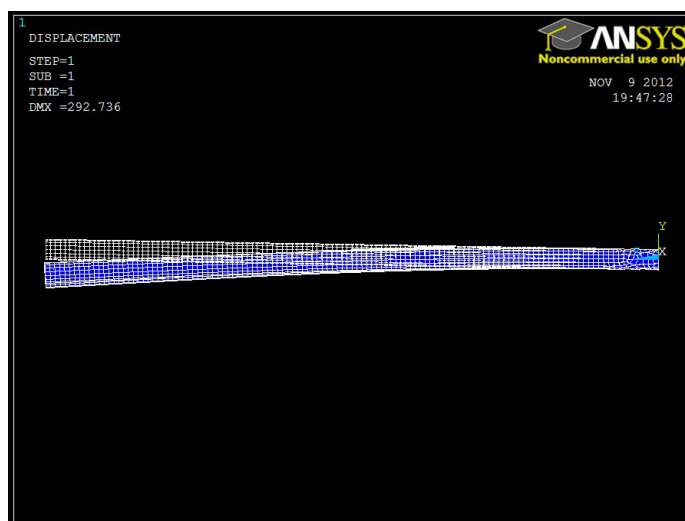


Ilustración 97 Vista lateral deformación

Vista isométrica del respaldo deformado.

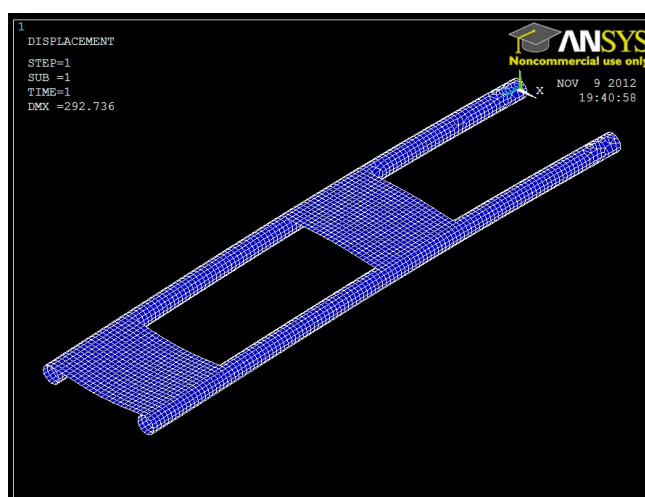


Ilustración 98 Vista isométrica deformación

- Tensiones

En las siguientes imágenes se muestran las distribuciones de tensiones internas del respaldo:

En esta imagen se puede apreciar la distribución de tensiones a lo largo de los tubos, en el margen inferior vienen representados los valores de las tensiones máximas y el color en el que se representa cada zona de tensión.

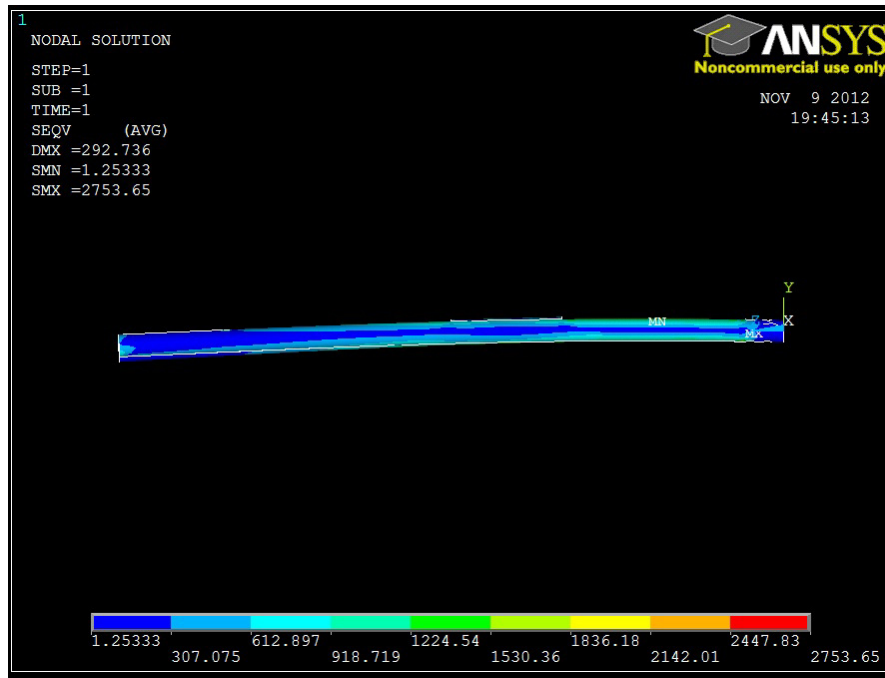


Ilustración 99 Vista lateral tensiones

En la vista en isométrico podemos ver que los puntos de mayor tensión se producen en los taladros de anclaje, siendo éstos de valor:

$$\sigma = 2753,65 \frac{N}{cm^2} \times \frac{10^4 cm^2}{m^2} = 27,54 \times 10^6 \frac{N}{m^2}$$

Luego la tensión máxima sufrida por la pieza será:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 27,54 MPa$$

Como podemos ver en las imágenes la pieza no rompe, como explicamos anteriormente, esto se debe a que el límite elástico del aluminio estándar es aproximadamente de 414 Mpa y la tensión máxima de rotura de unos 483 Mpa.

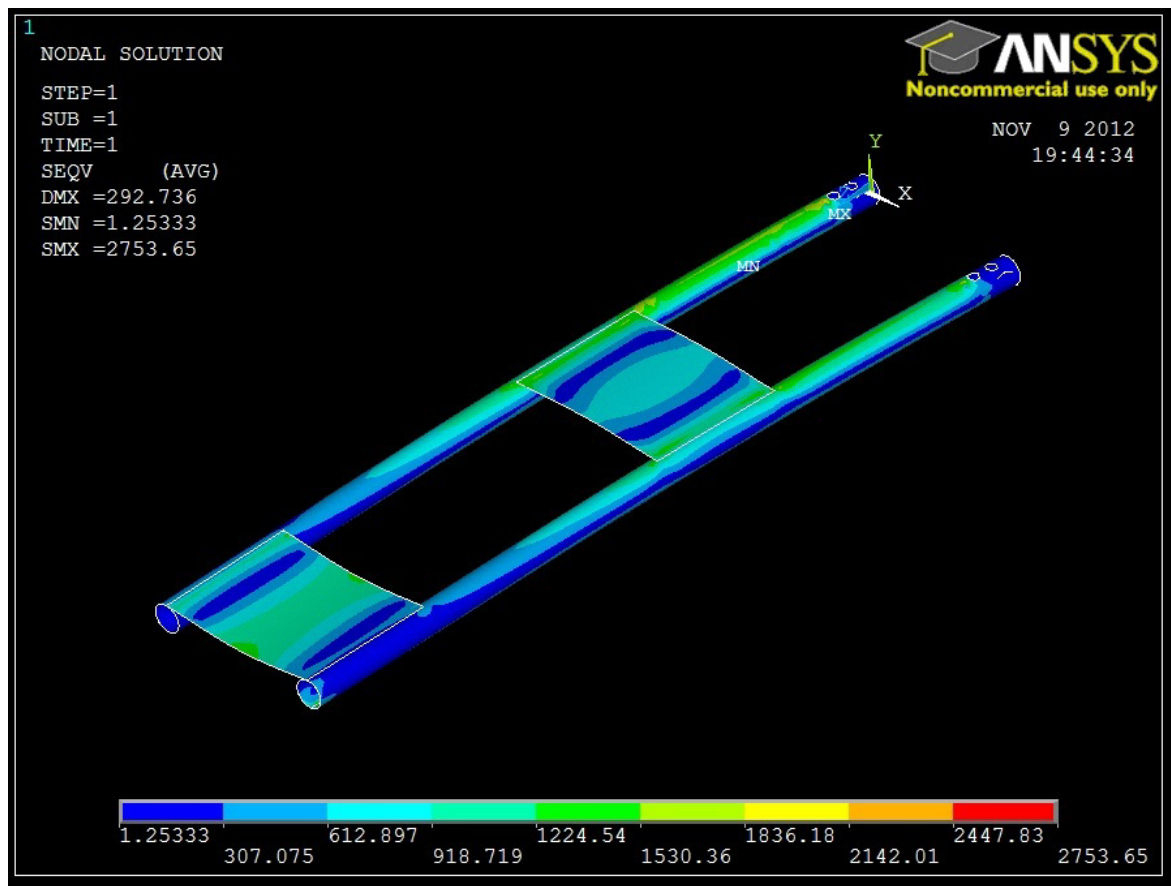


Ilustración 100 Vista isométrica tensiones

6.5 Presupuesto de fabricación

Este presupuesto no se corresponde con el presupuesto utilizado a lo largo del proyecto para la realización de las dos construcciones fabricadas, sino un presupuesto aproximado de lo que podría costar construir una silla como la segunda construcción realizada, acudiendo a las mismas grandes superficies y talleres a los que se acudió durante la realización del proyecto.

Número pieza	Nombre pieza	Dimensiones (mm)	Cantidad	Precio	Coste de fabricación
1	Perfil cuadrado aluminio	20x20x1	5.5 metros	6.75 €/m	37.13 €
2	Perfil circular aluminio	$\phi=20$, e=1	1.5 metros	6.75 €/m	10.13 €
3	Chapa aluminio	140x100	2 u	11.50 €/m ²	3.22 €
4	Listón Madera	50x20	0.4 metros	3.70 €/m	1.48 €
5	Correa transmisión	L=2200, 40x2	1 u	20 €/u	20.00 €
6	Correa seguridad	40x2	2 metros	3 €/m	6.00 €
7	Correa sujeción	20x1	2.5 metros	1.20 €/m	3.00 €
8	Lona asiento	500x400	1 u	15 €/m ²	3.00 €
9	Rueda monopatín	75x50	4 u	7 €/u	28.00 €
10	Buje bicicleta	100x50	2 u	15 €/u	30.00 €
11	Tornillo 150x8	L= 150, $\phi=8$	4 u	0.35 €/u	1.40 €
12	Tornillo 150x4	L=150, $\phi=4$	2 u	0.32 €/u	0.64 €
13	Tornillo 50x8	L= 50, $\phi=8$	16 u	0.17 €/u	2.72 €
14	Tornillo 70x8	L=70, $\phi=8$	2 u	0.20 €/u	0.40 €
15	Tornillo 60x8	L=60, $\phi=8$	2 u	0.19 €/u	0.38 €
16	Tuerca $\phi 8$	$\phi=8$	40u	0.07 €/u	2.80 €
17	Tuerca $\phi 4$	$\phi=4$	2 u	0.05 €/u	0.10 €
18	Arandela $\phi 8$	$\phi=8$	32 u	0.03 €/u	0.96 €
19	Arandela $\phi 4$	$\phi=4$	2 u	0.02 €/u	0.04 €
20	Remaches grandes	L=5, $\phi=2$	24 u	0.04 €/u	0.96 €
21	Remaches pequeños	L=3, $\phi=1$	32 u	0.03 €/u	0.96 €
22	Cierres correa 40	Ancho=40	2 u	1.50 €/u	3.00 €
23	Cierre correa 20	Ancho=20	3 u	1.00 €/u	3.00 €

Tabla 6 Piezas, dimensiones y costes

Notas: u=unidad; E=euro; L=longitud; ϕ =diámetro

Según vemos en la anterior tabla el coste que tendría para un particular, es decir, alguien que no tuviera acceso a productos y precios industriales, el coste de la segunda silla fabricada podría ascender a **160 euros**. Hay que tener en cuenta que esta segunda silla fabricada es un prototipo inacabado, ya que aún hay que añadir las ruedas tanto principales como secundarias, las guías para las ruedas y las patas de las ruedas secundarias. El presupuesto consumido en el proyecto ha sido mucho mayor ya que se han fabricado dos sillas diferentes y se han probado modos de fabricación que luego no han dado resultado. Por otro lado, durante el proyecto se ha ahorrado mucho dinero con la obtención de muchas piezas de segunda mano sin coste alguno, como la lona del asiento, las ruedas de monopatín, los bujes de bicicleta y las chapas de aluminio.

7 Conclusiones del proyecto

- A pesar de la gran cantidad de soluciones existentes, superar tramos escalonados es aún un problema que no se ha resuelto definitivamente para las sillas de ruedas.
- Sobre la solución desarrollada en este proyecto habrá que trabajar aún mucho más, se habrán de fabricar más prototipos y buscar mejoras.
- Tras las pruebas con la segunda construcción se llegó a la conclusión de que seguramente será necesario en el futuro añadir algún tipo de freno que permita descansar al usuario entre escalón y escalón.
- El sistema para el plegado de las ruedas, aunque se ha diseñado una manera de hacerlo en este proyecto, habrá de ser desarrollado y fabricado en el futuro.
- Tras las pruebas con el segundo prototipo se vio que el esfuerzo físico requerido para subir y bajar escalones a pulso es mayor de lo esperado.
- La madera como material de fabricación de sillas de ruedas puede ser una buena opción, por lo fácil que resulta trabajar con ella y por su bajo coste.
- Realizar un prototipo por uno mismo puede resultar muy difícil y poco eficiente, al realizar un prototipo de cierta complejidad lo mejor es dejar la parte de la fabricación a un experto que posea los medios adecuados. Una vez fabricado el prototipo se pueden buscar maneras alternativas de fabricación con menos recursos y medios.

8 Referencias

- [1] “Revista de sillas de ruedas”, <http://www.guiamovilidad.com/noticias/129-historia-de-las-sillas-de-ruedas.html>
- [2] Organización Mundial de la Salud (OMS), *Informe Mundial Sobre la Discapacidad*, 2011
- [3] Federación Española de Ortesistas Protesistas (FEDOP), *Adaptación de sillas de ruedas*, 30/04/2009
- [4] Organización de las Naciones Unidas (ONU), *Convención de los Derechos de las Personas con Discapacidad de las Naciones Unidas*, 2008
- [5] Código Técnico de Edificación en España (CTE), *Documento Básico de Seguridad de Utilización (DB-SU)*, REAL DECRETO 314/2006, 2006-03-17
- [6] Código Técnico de Edificación en España (CTE), *Normativa DB-SU apartado 4.2.1*, REAL DECRETO 314/2006, 2006-03-17
- [7] GUO YONGLI [CN], *Wheelchair able to cowl stairs*, CN2461518Y (2001-02-16)
- [8] YULAN ZHOU, YONGJUN MA (+2), *Stair-Climbing wheelchair*, CN102204858A (2011-05-27)
- [9] GUANGBAO CHEN [CN], *Multifunctional wheelchair capable of walking u (down) stairs*, CN 2139437Y (1992-07-24)
- [10] WATKINS CECIL JAMES, WATKINS SIMON ROBERT, *Stair Vehicle*, GB2112330A (1981-10-05)
- [11] CHIN BUNZEN, *SELF-PROPELLED WHEELCHAIR*, JP2001017480A (1999-06-28)
- [12] ZHANG FANGMING [CN], *Tire of wheelchair capable of climbing stairway*, CN101003290A (2007-01-21)
- [13] HOFFMANN MANFRED [DE], *Wheelchair for climbing e.g.spiral stairs, has running [...]of rear wheels*, DE102009052253A1 (2009-11-06)
- [14] ZHIFENG YAN [CN], *Wheelchair capable of ascending/descending stairs*, CN201005886Y (2007-01-25)
- [15] ZHIQI WANG [CN], *Manpower wheel-chair for climbing stairs*, CN201135560Y (2007-12-04)
- [16] *Wheelchair, has stairs climbing unit like crawler and including lever which is rotatably fixed [...] seat rear edge* DE102006049711A1 (2005-10-19)
- [17] YUSHUI LI, *Electric wheelchair capable of climbing stairs*, CN201492595U, (2009-08-20)
- [18] SHUKUI LIU, BAIXU LIU (+1), *Multifunctional 4-wheel driving power wheelchair* CN201642630U (2010-04-02)

- [19] KOTLAROV PETER [DE], *Stair climber for autonomous climbing, adaptable to manual wheelchairs*, GB2433731A (2004-04-18)
- [20] NISHIZUKA TORU, *STAIRS ELEVATING/LOWERING AUXILIARY DEVICE FOR WHEELCHAIR*, JP11239589A (1998-02-24)
- [21] HYUNG HYENG SHIN [KR], *STAIR IN A HURRY, CARRIER* KR20100084727A (2009-01-19)
- [22] OKAZAKI TATSUO, *WHEELCHAIR FOR UNIVERSAL TRAVELLING IN STAIRS, STEP, AND ROUGH ROAD, AND TRAVELLING METHOD*, JP2007125348A (2005-11-05)
- [23] GUO YONGLI [CN], *Wheelchair capable of going up stairs*, CN2464305Y (2001-02-16)
- [24] GUOZHONG ZHANG [CN], JINGMING LU [CN] (+1), *Crawler wheel chair capable of going up stairs onwards of backwards* CN201267580Y 2008-09-28 ()
- [25] “Administración de sillas de ruedas a personas con discapacidad alrededor del mundo”, <http://www.motivation.org.uk/>
- [26] “Fundación de suministro de sillas de ruedas de bajo presupuesto”, http://www.freewheelchairmission.org/site/c.fgLFIXOJKtF/b.4979157/k.83B0/GEN_1_Design.htm
- [27] Osterkamp LK, J Am Diet Assoc, *Current perspective on assessment of human body proportions of relevance to amputees*, 1995